

Proyecto Fin de Máster
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

**Análisis morfodinámico de la desembocadura
del río Guadiana**

Autor: David Díaz Peña

Tutor: Alejandro López Ruiz

**Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Caminos, Canales y Puertos

Análisis morfodinámico de la desembocadura del río Guadiana

Autor:
David Díaz Peña

Tutor:
Alejandro López Ruiz
Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Máster: Análisis morfodinámico de la desembocadura del río Guadiana

Autor: David Díaz Peña

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, y antes de todo, agradezco enormemente a mi familia el apoyo recibido durante estos 6 años. A mis padres, mis hermanos y mis abuelos que siempre han estado ahí para apoyarme y animarme en momentos complicados.

Por otro lado, quería agradecer a todos y cada uno de los profesores que me han impartido clase durante el Grado y el Máster.

A mis amigos de toda la vida, a los que me he encontrado en Sevilla y, sobre todo, a mis amigos de la clase. Estoy seguro de que sin ellos hubiera sido todo más complicado.

Para finalizar, agradecer enormemente a mi tutor Alejandro López el trato recibido durante la realización de este proyecto. Gracias por facilitarme el trabajo y por la disponibilidad.

RESUMEN

La hidrodinámica del estuario del río Guadiana (suroeste de España) está controlada por la acción conjunta del oleaje, las variaciones del nivel del mar, la descarga fluvial y el viento. La particularidad de este estuario es la existencia de un delta sumergido en la entrada de la desembocadura que en condiciones extremas limita las condiciones de navegabilidad del mismo. Esta problemática es considerada como el resultado antes los cambios bruscos que se han dado en la hidrodinámica de la desembocadura como respuesta a la construcción de los diques paralelos de encauzamiento de la desembocadura entre los años 1972 y 1974 junto con la gran regulación del río, tanto en caudal como en aporte de sólidos en su descarga, a lo largo de su recorrido mediante la construcción de presas u otras obras civiles. Para asegurar la seguridad en la navegación, la Agencia Pública de Puertos de Andalucía ha llevado a cabo operaciones de dragado del canal de navegación en los años 1987 y 2015.

A partir de la batimetría del año 2016 y a través del análisis de los resultados preliminares obtenidos mediante un modelo numérico junto con alguna modificación en la batimetría inicial, se ha definido la discretización numérica de la zona de estudio para posibilitar una caracterización válida de la hidrodinámica de la desembocadura. Con esta herramienta se ha estudiado dicha hidrodinámica mediante el análisis de los resultados proporcionados por el modelo ante diferentes escenarios de simulación.

Los datos de la zona de estudio utilizados en este trabajo muestran que el estuario consiste en un sistema mesomareal y semidiruno, con una carrera de marea media de 2 m. La marea tiene influencia en toda la zona de estudio, inundando una amplia zona de marismas y avance de la línea de costa sobre todo en el margen de la costa española. La dirección de procedencia de oleaje más frecuente es WSW, con alturas de ola entre 0 y 5 m y periodos de pico entre 2 y 21 s, predominando las alturas de ola inferiores a 1 m y periodos pico entre 4 y 6 s. Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes son NNW y SW, con rango de velocidades de viento entre 0 y 21 m/s y más frecuentes entre 2 y 6 m/s.

En situaciones de bajamar, sobre todo en las máximas, la profundidad en el canal de navegación se considera insuficiente para el cumplimiento de las condiciones mínimas de navegabilidad. Esta problemática se incrementa ante la acción del oleaje con dirección de procedencia WSW o SW, las cuales son las de mayor probabilidad de ocurrencia en el dominio de estudio llegándose a alcanzar calados de valores inferiores a 2.5 m. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que la dinámica de la zona de estudio resulta con un comportamiento del modelo numérico en el cual se observan resultados que tienden a la reducción del calado en la zona más cercana del canal de navegación a la bocana de la desembocadura, considerándose con la zona más crítica y de mayor interés en el estudio del mismo.

En cuanto a los resultados obtenidos a partir de la simulación de los diferentes escenarios o temporales seleccionados, se llega a la conclusión de que la existencia del río en el modelo, tanto en descarga de caudal como en aporte de sólidos al dominio de estudio, provoca un aumento considerable del volumen de sedimentos depositados y erosionados y, por lo tanto, una dinámica más intensa sobre todo en los escenarios “T1” y “T2” donde las condiciones de oleaje y clima marítimo son más extremos. Por otro lado, tras el análisis de la influencia del oleaje a partir de los cambios de batimetría en el canal de navegación al finalizar la simulación de cada escenario de simulación se demuestra que en tanto en “T1”, como en “T2” se tiende a un desplazamiento del “Outer Shoal” hacia la bocana de la desembocadura, con zonas de grandes erosiones y sedimentaciones que podrían dificultar en instantes de bajamar la navegabilidad del mismo. En cuanto al análisis global del dominio

de estudio, se llega a la conclusión de la existencia de una gran sedimentación en la zona costera portuguesa la cual se encuentra adyacente con una zanja erosiva. Dicha zona tiene una continuidad hasta la zona del dique, prolongándose hasta la zona de “Lateral Bar” y “Outer Shoal”. En cambio, en la zona más cercana a la costa española, se encuentran zonas de erosión y sedimentación aisladas y con una irregularidad en cuanto a su formación. Estos resultados analizados a partir de la dinámica, son de mayor intensidad en “T1”, mientras que en “T2” y “T3” se encuentran resultados más suaves pero que siguen la misma tendencia.

Los resultados muestran que la zona de estudio es un dominio muy dinámico, con gran transporte de sedimentos y de acción de las mareas, con un oleaje con una dirección predominante bastante aislada y con grandes cambios en su batimetría tanto en condiciones de calma como en temporales. La zona de estudio no se encuentra en equilibrio dinámico debido a la construcción del encauzamiento del estuario, entre otras obras civiles, y al continuo cambio en la regulación a la que ha sido sometido el río a lo largo de la historia mediante la construcción de embalses en su recorrido. Se demuestra que la tendencia de la dinámica de la desembocadura, debido a los diversos factores que se han ido desarrollando y describiendo a lo largo del trabajo, es de ser cerrada mediante la deposición de sedimentos y a la generación de diferentes formaciones a lo largo de la zona más cercana a la bocana de la desembocadura. Este hecho es explicado mediante los continuos trabajos de dragado que se realizan en la misma para poder seguir posibilitando la navegación de un río tan importante en el panorama español como es el Guadiana.

ABSTRACT

The hydrodynamics of the river Guadiana estuary (southwest of Spain) are controlled by the joint action of waves, sea level variations, river discharge and wind. This estuary's particularity is the existence of an immersed delta at the entrance of the river mouth which limits the navigability of the aforementioned under extreme conditions. This problem results from the sudden changes the hydrodynamics of the river mouth has been subjected to because of the construction of parallel dams channelling the river mouth between 1972 and 1974 as well as of the river's regulation – both in flow and solid content – along its course through the construction of dams or other civil engineering works. To ensure the safety of its navigability, the Andalusian Public Ports Agency has carried out dredging works in the navigation channel between 1987 and 2015.

Through the 2006 bathymetry and the analysis of the preliminary results obtained through a numerical model – as well as with some modifications of the initial bathymetry – a discretization of the study zone has been carried out, allowing a valid characterisation of the river mouth's hydrodynamics. With the results obtained from the model in different simulation scenarios, the hydrodynamics have been studied.

The study zone data used in this project shows that the estuary consists on both a mesomareal and semidiurnal system with a tidal run of 2 meters average. The tide influences the whole study zone, flooding a wide marshland area and advanced coast line, especially in the Spanish coast side. The most frequent wave direction is WSW – with wave heights ranging from 0 to 5 meters and peak periods of 2 and 21 seconds – being waves of less than 1 meter and peak periods of 4 to 6 seconds predominant. The most common wind directions have been NNW and SW, with speeds ranging from 0 to 21 meters/second and more frequently between 2 and 6 meters/second.

In low tide situations – especially in the lowest ones – the depth of the navigation channel is not enough to comply with the minimum navigability conditions. This problem is more noticeable when considering the influence of winds originating from WSW or SW – something that is a common situation in the study domain – reaching draughts lower than 2.5 meters. The dynamics of the study zone results from the behaviour of the numerical model, in which results which tend to the reduction of the draught depth in the area where the navigation channel is closer to the estuary mouth are observed. Consequently, this is considered the most critical and study-worthy area of the project analysis.

As for the results obtained from the simulation of the different scenarios or selected temporals, it is concluded that the existence of the river in the model, both in discharge of flow and in contribution of solids to the domain of study, causes a considerable increase in the volume of sediments deposited and eroded and, therefore, a more intense dynamic especially in the scenarios "T1" and "T2" where the conditions of waves and sea climate are more extreme. On the other hand, after the analysis of the influence of the waves from the changes of bathymetry in the navigation channel at the end of the simulation of each simulation scenario is shown that in both "T1", as in "T2" tends to a displacement of the "Outer Shoal" toward the estuary, with zones of great erosions and sedimentations that could hinder the airworthiness of the low tide. As for the overall analysis of the study domain, the conclusion is reached of the existence of a large sedimentation in the Portuguese coastal area which is adjacent to an erosive ditch to hinder the airworthiness of the same one in moments of low tide. As for the overall analysis of the study domain, the conclusion is reached of the existence of a large sedimentation in the Portuguese coastal area which is adjacent to an erosive ditch. This area has a continuity to the area of the dike, extending to the area of "Lateral Bar" and "Outer Shoal". On the other hand, in the area closest to the Spanish coast, there are zones of erosion and sedimentation isolated and with an irregularity in terms of their

formation. These results analysed from the dynamics, are of greater intensity in "T1", whereas in "T2" and "T3" are found smoother results but that follow the same tendency

Results show that that study zone is a highly dynamic domain, with vast quantities of sediments being transported and intense tidal action, with waves of isolated predominant direction and considerable bathymetry changes – both under calm conditions and thunderstorm ones. The study zone is not in dynamic equilibrium because of the construction of the estuary channelling – among other civil engineering works – and the uninterrupted regulation changes the river has been subjected to throughout history with the construction of dams along its course. It has been demonstrated that the mouth river's dynamic tends to be obstructed with sediments and several formations along the area which is closest to the estuary's mouth. This explains the continuous dredging works carried out in the area to ensure navigability in such an important Spanish river as Guadiana is.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
1.2.1 <i>Objetivos principales</i>	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3 <i>Estructura</i>	3
CAPÍTULO 2	4
ZONA DE ESTUDIO	4
2.1 <i>Situación y descripción</i>	4
2.2 <i>Descripción de los agentes</i>	4
2.2.1.1 <i>Comportamiento Mareal</i>	5
2.2.1.2 <i>Régimen fluvial y aporte sólido del río</i>	5
2.2.2 <i>Comportamiento dinámico del estuario.</i>	6
2.2.2.1 <i>Circulación de masas de agua</i>	6
2.2.2.2 <i>Deriva Litoral y Transporte de sedimentos.</i>	7
2.3 <i>Geomorfología</i>	8
2.3.1 <i>Evolución histórica de la desembocadura</i>	8
2.4 <i>Clima marítimo</i>	11
2.4.1 <i>Datos de partida</i>	11
2.4.2 <i>Descripción general del oleaje y viento en profundidades indefinidas</i>	11
2.4.3 <i>Régimen medio</i>	13
2.4.4 <i>Régimen extremal</i>	14
2.4.5 <i>Variaciones del nivel del mar</i>	15
2.4.5.1 <i>Marea astronómica</i>	15
2.4.5.2 <i>Marea meteorológica</i>	16

CAPÍTULO 3	17
METODOLOGÍA	17
3.1 <i>Modelo numérico</i>	17
3.1.1 Módulo FLOW	17
3.1.2 Módulo WAVE	19
3.2 <i>Escenarios de simulación</i>	20
3.2.1 Temporales	20
3.2.1.1 Temporal 1 WSW	20
3.2.1.2 Temporal 2 SW	21
3.2.1.3 Temporal 3 SE	22
3.2.2 Estado de Calma	23
3.2.3 Simulación de Larga duración	24
3.3 <i>Implementación del modelo en la zona de estudio</i>	26
3.3.1 Grid	26
3.3.2 Batimetría	27
3.3.3 Archivo WAVECON	27
3.3.4 Archivo de comunicación	27
3.3.5 Condiciones de contorno	27
3.3.6 Puntos de control	28
3.3.7 Spline	29
3.3.8 Delimitación de las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”	29
3.3.9 Problemas y medidas adoptadas	30
 CAPÍTULO 4	 31
ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
4.1 <i>Introducción</i>	31
4.2 <i>Hidrodinámica en la zona de estudio</i>	32
4.2.1 Elevación del nivel del agua	32
4.2.2 Profundidad	36
4.2.3 Velocidad de corriente	40
4.2.4 Influencia de Descarga del río	42
4.2.4.1 Influencia en vía de navegación	42
4.2.4.2 Influencia en el dominio	44
4.2.4.3 Influencia en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”	49
4.2.5 Influencia del Oleaje	53
4.2.5.1 Influencia en vía de navegación	53
4.2.5.2 Influencia en el dominio de estudio	56
4.2.5.3 Influencia en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”	62
4.2.6 Simulación a largo plazo	64
4.2.6.1 Influencia en vía de navegación	64
4.2.6.2 Influencia en el dominio de estudio	65
4.2.6.3 Influencia en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”	68
 CAPÍTULO 5	 70
CONCLUSIONES	70

CAPÍTULO 6	72
FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	72
APÉNDICE A	73
CLIMA MARÍTIMO	73
A.1 <i>Implementación del modelo en la zona de estudio</i>	73
A.2 <i>Oleaje</i>	74
A.2.1 <i>Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas</i>	74
A.2.2 <i>Régimen medio de H_s en profundidades indefinidas</i>	79
A.2.3 <i>Régimen extremal de H_s en profundidades indefinidas</i>	80
A.3 <i>Viento</i>	82
A.3.1 <i>Descripción general del viento en profundidades indefinidas</i>	82
A.3.2 <i>Régimen medio de V_s en profundidades indefinidas</i>	86
A.3.3 <i>Régimen extremal de V_s en profundidades indefinidas</i>	87
REFERENCIAS	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.3-1. Volumen de sedimentos fluviales aportados a la región costera en la desembocadura del río Guadiana ((Da Silva Costa & Fraidias Amarillo, 1997)	9
Tabla 2.4-1. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola en “SIMAR5026021”.	14
Tabla 2.4-2. Tabla resumen del régimen medio para la velocidad del viento en “SIMAR5026021”.	14
Tabla 2.4-3. Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola en “SIMAR5026021”.	14
Tabla 2.4-4. Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad del viento en “SIMAR5026021”.	15
Tabla 2.4-5. Armónicos de marea (Mareógrafo Huelva 5)	16
Tabla 4.2-1. Instantes seleccionados de bajamar y pleamar máxima y mínima en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración.	32
Figura 4.2-1. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T1 WSW en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-2	33
Figura 4.2-2. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T2 SW en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-3	33
Figura 4.2-3. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T3 SE en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-4	34
Figura 4.2-4. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio Estado de Calma en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-5	34
Figura 4.2-5. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Bajamar Mínima definido en la Tabla 4.2-6 en los escenarios de simulación de corta duración	35
Figura 4.2-6. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Pleamar Mínima definido en la Tabla 4.2-7 en los escenarios de simulación de corta duración	35
Figura 4.2-7. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Bajamar Máxima definido en la Tabla 4.2-8 en los escenarios de simulación de corta duración	35
Figura 4.2-8. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Pleamar Máxima definido en la Tabla 4.2-9 en los escenarios de simulación de corta duración	36
Tabla 4.2-10. Instantes de representación de velocidad de corriente	40
Tabla 4.2-11. Volumen de sedimento en m ³ de sedimentación y erosión acumuladas en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración.	48
Tabla 4.2-12. Diferencia de porcentual de sedimentos en m ³ de sedimentación y erosión acumuladas en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración.	48
Tabla 4.2-13. Balance del volumen de sedimentos en m ³ y balance porcentual respecto a la sedimentación	

acumulada en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos. 48

Tabla 4.2-14. Diferencia porcentual de los balances de volumen de sedimentos respecto al balance en el dominio de estudio en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos. 49

Tabla 4.2-15. Volumen de sedimento en m^3 de sedimentación y erosión acumuladas en el dominio de estudio en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos. 50

Tabla 4.2-16. Balance de volumen de sedimento en m^3 y porcentual respecto a la sedimentación acumulada en las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos. 51

Tabla 4.2-17. Diferencia porcentual de volumen de sedimento de sedimentación y erosión acumuladas respecto a la sedimentación acumulada en las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos. 52

Tabla 4.2-18. Volumen de sedimento en m^3 de erosión y sedimentación acumulada además del balance en el dominio de estudio en cada uno de los escenarios de simulación. 57

Tabla 4.2-19. Volumen de sedimento en m^3 de erosión y sedimentación acumulada además del balance y de la proporción respecto al volumen obtenido en el dominio de estudio en su totalidad en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación. 62

Tabla 4.2-20. Volumen de sedimento en m^3 de erosión y sedimentación acumulada además del balance en el escenario de simulación “Larga Duración” en el dominio de estudio. 67

Tabla 4.2-21. Volumen de sedimento en m^3 de erosión y sedimentación acumulada además del balance y de la proporción respecto al volumen obtenido en el dominio de estudio en su totalidad en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en escenario de simulación “Larga Duración”. 68

Tabla A. 1. Porcentaje de Alturas de Ola 75

Tabla A. 2. Porcentaje de Periodos de Pico 76

Tabla A. 3. Porcentajes de Dirección del Oleaje 77

Tabla A. 4. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio de altura de ola 79

Tabla A. 5. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola 80

Tabla A. 6. Parámetros de la distribución GEV para el régimen extremal de altura de ola 81

Tabla A. 7. Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola 82

Tabla A. 8. Porcentajes de velocidades de viento. 83

Tabla A. 9. Porcentaje de velocidades de viento 84

Tabla A. 10. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio de velocidades de viento. 86

Tabla A. 11. Tabla resumen del régimen medio para la velocidad del viento. 87

Tabla A. 12. Parámetros de la distribución GEV para el régimen extremal de velocidad del viento 88

Tabla A. 13. Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad del viento 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.2-1. Circulación del estuario externo del Guadiana. Fase de flujo y reflujo. Modelo Tejedor, L. (1986) (José Fraidías Amarillo, 1997)	6
Figura 2.2-2. Estadios de circulación de las masas de agua en el estuario del río Guadiana. Modelo Morales, J.A. (1995) (José Fraidías Amarillo, 1997)	7
Figura 2.2-3. Circulación del flujo y reflujo mareal en el estuario del Guadiana. (Borrego, 1992) (José Fraidías Amarillo, 1997)	8
Figura 2.3-1. Representación topográfica y batimétrica del estuario del río Guadiana. Elementos morfológicos que lo componen (Garel E. , 2017).	9
Figura 2.3-2. Evolución batimétrica del delta del Guadiana desde 1969 hasta 2016 con la localización del “ <i>Outer Shoal</i> ” (rojo) y canal de navegación (verde) (Garel E. , 2017).	10
Figura 2.4-1. Serie temporal de altura ola en “SIMAR5026021”.	12
Figura 2.4-2. Serie temporal de velocidad del viento “SIMAR5026021”.	12
Figura 2.4-3. Rosa de oleaje en “SIMAR5026021”.	13
Figura 2.4-4. Rosa de viento en “SIMAR5026021”.	13
Figura 2.4-5. Nivel del mar, marea astronómica y marea meteorológica en REDMAR Huelva 5.	15
Figura 2.4-6. Marea astronómica a lo largo del tiempo en REDMAR Huelva 5.	16
Figura 3.2-1. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Temporal 1	20
Figura 3.2-2. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Temporal 1.	21
Figura 3.2-3. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Temporal 2	21
Figura 3.2-4. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Temporal 2.	22
Figura 3.2-5. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Temporal 3	22
Figura 3.2-6. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Temporal 3.	23
Figura 3.2-7. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Estado de Calma	23
Figura 3.2-8. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Estado de Calma	24
Figura 3.2-9. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Escenario de larga duración.	25
Figura 3.2-10. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Escenario de larga duración	25
Figura 3.3-1. Definición de los contornos de los grid empleados.	26
Figura 3.3-2. Representación gráfica de la batimetría inicial empleada en el modelo	27

Figura 3.3-3. Contornos del modelo	28
Figura 3.3-4. Representación de ubicación de los Puntos de Control en el dominio de estudio.	28
Figura 3.3-5. Canal de navegación modelado como Spline en la batimetría inicial.	29
Figura 3.3-6. Representación de la delimitación del “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en el dominio de estudio.	29
Figura 3.3-7. Batimetría original y batimetría modificada en la zona de descarga del río Guadiana además del aumento de cota de la rasante del Dique de Poniente	30
Figura 4.2-1. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T1 WSW en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-2	33
Figura 4.2-2. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T2 SW en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-3	33
Figura 4.2-3. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T3 SE en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-4	34
Figura 4.2-4. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio Estado de Calma en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-5	34
Figura 4.2-5. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Bajamar Mínima definido en la Tabla 4.2-6 en los escenarios de simulación de corta duración	35
Figura 4.2-6. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Pleamar Mínima definido en la Tabla 4.2-7 en los escenarios de simulación de corta duración	35
Figura 4.2-7. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Bajamar Máxima definido en la Tabla 4.2-8 en los escenarios de simulación de corta duración	35
Figura 4.2-8. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Pleamar Máxima definido en la Tabla 4.2-9 en los escenarios de simulación de corta duración	36
Figura 4.2-9. Profundidad en la zona de estudio en el escenario T1 WSW en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1	36
Figura 4.2-10. Profundidad en la zona de estudio en el escenario T2 SW en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1	37
Figura 4.2-11. Profundidad en la zona de estudio en el escenario T3 SE en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1	37
Figura 4.2-12. Profundidad en la zona de estudio Estado de Calma en instantes de bajamar y pleamar máximas definidos en la Tabla 4.2-1	38
Figura 4.2-13. Profundidad en canal de navegación en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1 en escenarios de simulación de corta duración.	39
Figura 4.2-14. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante, definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio T1 WSW	40
Figura 4.2-15. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante, definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio. T2 SW	40
Figura 4.2-16. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio. T3 SE	41
Figura 4.2-17. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante, definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio. Estado de Calma	41
Figura 4.2-18. “Depth averaged discharge” en Puntos de Control 1 y 2 en los distintos escenarios de simulación de corta duración.	42
Figura 4.2-19. “Depth Averaged velocity” en Puntos de Control 1 y 2 en escenarios de simulación de corta duración.	43

Figura 4.2-20. Representación comparativa del cambio de batimetría en función de incluir en el modelo la descarga del río en escenarios de simulación de corta duración.	44
Figura 4.2-21. Representación del alcance del sedimento procedente de la descarga del río en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración.	45
Figura 4.2-22. Diferencias de batimetrías finales en el dominio de estudio en función de la existencia de descarga del río en el modelo en escenarios de simulación de corta duración.	46
Figura 4.2-23. Representación 3D de la diferencia de la batimetría final en función de la existencia de descarga del río en el modelo en “T1”.	46
Figura 4.2-24. Representación 3D de la diferencia de la batimetría final en función de la existencia de descarga del río en el modelo en “T2”.	47
Figura 4.2-25. Representación 3D de la diferencia de la batimetría final en función de la existencia de descarga del río en el modelo en “T3”.	47
Figura 4.2-26. Representación de la erosión y sedimentación acumulada debido a la descarga del río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación.	50
Figura 4.2-27. Representación de la erosión y sedimentación acumulada río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” debido a la influencia de la descarga en cada uno de los escenarios de simulación. El transporte hipotético se encuentra representado mediante flechas con longitudes proporcionales a su magnitud además del signo del balance de cada zona descrita, significando el “signo +” una ganancia de sedimentos en la misma.	52
Figura 4.2-28. Representación de las Batimetrías finales en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración.	54
Figura 4.2-29. Representación de las Batimetrías finales en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en zonas con mayor relevancia.	54
Figura 4.2-30. Erosión o sedimentación lineal acumulada a lo largo del canal de navegación en escenarios de simulación de corta duración.	55
Figura 4.2-31. Erosión o sedimentación acumulada en el dominio de estudio en función de la dirección predominante del oleaje.	56
Figura 4.2-32. Representación 3D de la batimetría inicial, común a todos los escenarios de simulación.	58
Figura 4.2-33. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en “T1”.	59
Figura 4.2-34. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en “T2”.	60
Figura 4.2-35. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en “T3”.	61
Figura 4.2-36. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en “Estado de Calma”.	62
Figura 4.2-37. Representación de la erosión y sedimentación acumulada río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación. El transporte hipotético se encuentra representado mediante flechas con longitudes proporcionales a su magnitud además del signo del balance de cada zona descrita, significando el “signo +” una ganancia de sedimentos en la misma.	63
Figura 4.2-38. Erosión o sedimentación acumulada a lo largo del canal de navegación en forma de comparación de las batimetría inicial y final en el “eje y” izquierdo, junto con Erosión o sedimentación acumulada a lo largo del canal de navegación en el “eje y” derecho.	65
Figura 4.2-39. Batimetría inicial y final del escenario “Larga Duración” en el dominio de estudio. Izquierda y derecha respectivamente.	66
Figura 4.2-40. Erosión y sedimentación acumulada en el dominio de estudio en escenario “Larga Duración”.	66
4.2-41. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en simulación “Larga Duración”.	68

Figura 4.2-42. Representación de la erosión y sedimentación acumulada río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en el “Escenario de Larga Duración”. El transporte hipotético se encuentra representado mediante flechas con longitudes proporcionales a su magnitud además del signo del balance de cada zona descrita, significando el “signo +” una ganancia de sedimentos en la misma. 69

Figura A. 1 Localización del punto SIMAR 5026021.	73
Figura A. 2. Serie temporal de altura de ola Significante	74
Figura A. 3. Histograma de Altura de Ola	75
Figura A. 4. Histograma de Periodos de Pico	76
Figura A. 5. Histograma Dirección del Oleaje	77
Figura A. 6. Gráfico de Dispersión $T_p - H_s$	78
Figura A. 7. Gráfico de Dispersión $H_s - \Theta$	78
Figura A. 8. Gráfico de Dispersión $T_p - \Theta$	78
Figura A. 9. Rosa de Oleaje “SIMAR 5026021”	79
Figura A. 10. Función de densidad de probabilidad tipo Weibull para régimen medio de altura de ola	80
Figura A. 11. Función de distribución tipo Weibull para régimen medio de altura de ola	80
Figura A. 12. Picos de Altura de Ola sobre Umbral con $H_s, u = 2.7 m$	81
Figura A. 13. Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola	82
Figura A. 14. Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola	82
Figura A. 15. Serie temporal de velocidades de viento.	83
Figura A. 16. Histograma de velocidades de viento	84
Figura A. 17. Histograma de dirección media de procedencia	85
Figura A. 18. Gráfico de dispersión $V_v - \theta_v$	85
Figura A. 19. Rosa de Viento	85
Figura A. 20. Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de velocidades de viento	86
Figura A. 21. Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidades de viento.	87
Figura A. 22. Picos de velocidad de viento sobre umbral con $V_v = 11.8 m/s$	87
Figura A. 23. Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de velocidades de viento	88
Figura A. 24. Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidades de viento	88

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La desembocadura del río Guadiana se ubica en el límite suroeste de la Península Ibérica, en la provincia de Huelva y hace frontera con el Algarve portugués. Consiste en un largo y estrecho estuario confinado por las rocas de las formaciones paleozoicas de la Zona Subportuguesa acompañado de un amplio delta en su sector marino, donde el confinamiento rocoso se abre a la acción del oleaje. La morfología de la zona externa de la desembocadura está caracterizada por la existencia de una amplia flecha litoral en el margen portugués acompañada de marismas en la zona trasera además de varias líneas de islas barrera separadas por sedimentos mareales en la costa española, donde se desarrollan las marismas de Ayamonte e Isla Cristina. En cuanto a la morfología de la zona frontal del canal estuarino, se desarrolla un externo delta sumergido constituido por amplias plataformas sumergidas que se conocen localmente como “La Gola”.

El sistema es mesomareal y semidiurno, con una carrera media de 2 m, oscilando entre 4 m durante las mareas máximas y 1 m durante las mareas mínimas. La marea tiene influencia en toda la zona de estudio, inundando una amplia zona de marismas y avance de la línea de costa sobre todo en el margen de la costa española. La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es WSW, con alturas de olas entre 0 y 6 m y periodos pico entre 2 y 21 s, siendo más frecuentes las alturas de ola inferiores a 1m y los periodos pico entre 4 y 6 s. Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes son NNW y SW, con rango de velocidades de viento entre 0 y 21 m/s y más frecuentes entre 2 y 6 m/s.

El sistema estuarino que conforma a la desembocadura del río Guadiana siempre ha sido caracterizado por ser considerado como una “unidad fisiográfica cerrada” debido a presentar el factor determinante en su morfología de un gran transporte litoral de sedimentos hacia el este (Morales González, 1997). A lo largo de la historia, la desembocadura ha sido caracterizada por la presencia de un gran sistema de bancos de arena que acumulaba la deriva litoral en el margen occidental del estuario. Durante el transcurso de las décadas, dicho sistema de bancos de arena fue experimentando periodos cíclicos de crecimiento hacia el este (Gonzalez, 2001). junto con una rotación hacia el margen este (LNEC, 2002) (Gonzalez, 2001), problema que fue solventado con la construcción de los diques de encauzamiento del Guadiana entre los años 1972 y 1974 para la estabilización de la entrada de la desembocadura y mejorar sus condiciones de navegabilidad. La construcción de dichos diques paralelos provocó la modificación de la hidrodinámica de la zona comenzando una etapa de evolución rápida en su morfología y batimetría, desapareciendo la parte oriental del Banco O’Brill y apareciendo las nuevas zonas denominadas como “Lateral Bar”, el “Outer Shoal” y la “Downdrift Complex Area”. Estas características morfológicas fueron generadas y desarrolladas rápidamente debido a una gran contribución con arena local del Banco O’Brill (Garel E. , 2017). Este proceso ha producido distorsiones en la línea de costa formando un tómbolo frente al centro de la playa de Isla Canela y, como consecuencia de la absorción de arena, una importante

erosión a levante que permite realizar la predicción de un estadio futuro próximo: la formación de una zona de marismas en frente de Isla Canela que tocará el dique de poniente de Isla Cristina dejando a la actual línea de orilla lejana. (CEDEX, 2013).

La evolución y el cambio de la dinámica repentina de la zona de estudio por la construcción del encauzamiento de la desembocadura provocaron la limitación de la navegabilidad hacia el interior del estuario en mareas bajas, por lo que se llevaron a cabo operaciones de dragado en los años 1986 y 2005 para posibilitar y mejorar dichas condiciones además de un aumento de la vulnerabilidad de la costa de Isla Canela debido a una gran erosión (Garel E. F., 2011). A su vez, se realizaron varios estudios y análisis de la evolución de la costa debido a dichas operaciones (Gonzalez, 2001)., revelando una gran acumulación de sedimentos en las playas contra el dique oeste con diferentes valores de tasas de transporte litoral y suministrado por el propio río como concentración de la propia descarga (Portela, 2006).

Actualmente, dicha desembocadura conforma una unidad fisiográfica delimitada por las actuaciones de encauzamiento de los ríos dominado por el enfrentamiento dinámico entre la corriente fluvial y las mareas, produciendo un proceso de mezcla de aguas responsable de la sedimentación de material fino además de una descarga del material arenoso transportado en carga de fondo, en el que se pueden observar episodios de erosión, sedimentación y transporte de sedimentos a lo largo de la fachada litoral de toda la costa española y portuguesa adyacente. Dicha configuración es consecuencia del juego individual de factores físicos y de la interrelación existente entre los mismos, siendo dos agentes principales los que han modelado la morfología estuarina: la circulación de las masas de agua y el transporte de sedimentos.

Por lo tanto, la zona de estudio en la que se centra este proyecto se puede caracterizar como una zona que no se encuentra en equilibrio y donde las modificaciones morfológicas se dan a una velocidad elevada. El gran aporte de sólidos del río produce la generación de depósitos en su zona más próxima a la descarga, dándose una dinámica importante en transporte de sedimentos y en generación de corrientes debido a las mareas, además, de posibles problemas que podrían aparecer.

Estos problemas que pueden aparecer se centran en:

- Conflicto en la salida del río Carreras, Isla Cristina, entre el transporte de sedimentos y el uso portuario. lo que justifica las operaciones de dragado realizadas en 1987 y 2015 (Garel E. , 2017).
- Lugares de concentración de energía y lugares de abrigo de energía debido a los bajos.
- Reducción de aportes sólidos del río a la costa adyacente por la posible absorción de éstos por las zonas futuras de marismas, por lo que el transporte de sedimentos tendería al cierre de la desembocadura del río.
- Reducción del transporte longitudinal en el tramo del delta con una tendencia erosiva en el tramo contiguo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos principales

Los objetivos de este trabajo son principalmente dos. El primero de ellos consiste en desarrollar una caracterización hidrodinámica de la zona de estudio que permita a otros investigadores o ingenieros conocer la hidrodinámica de la desembocadura del río Guadiana con rigor mediante la generación de un modelo en Deflt3D identificada como una herramienta que posibilitaría el conocimiento de dicha hidrodinámica ante diferentes condiciones de clima o modificaciones puntuales en el ámbito de estudio, como operaciones de dragado, construcción de obras civiles o posibles aportes de material en ubicaciones locales. Hasta ahora se han realizado y publicado numerosos artículos en relación a la desembocadura de mención, pero ninguno ha descrito con detalle la dinámica de la misma, centrándose únicamente en problemas ocales y sin llevar a cabo una caracterización exhaustiva de los agentes climáticos que influyen en dicha hidrodinámica.

El segundo de ellos es determinar el comportamiento hidrodinámico de las formaciones o zonas características ubicadas en la desembocadura en función de las combinaciones de clima además del estudio de la influencia de la descarga del río en las mismas. Este objetivo se llevará a cabo mediante el análisis del transporte de sedimentos y de las modificaciones de la batimetría en las zonas mencionadas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para llevar a cabo los anteriores objetivos principales, estos se definirán a partir de los siguientes objetivos específicos:

- Descripción de la zona de estudio, tanto en su geomorfología como el clima marítimo.
- Estudio y análisis de la desembocadura a lo largo de la historia.
- Definición de los escenarios en los que se caracterizará la hidrodinámica.
- Implementación de un modelo numérico avanzado.
- Obtención de las variables que caracterizan la hidrodinámica.
- Estudio de la influencia de la descarga del río desde varios puntos de vista.
- Estudio del alcance del sedimento aportado por el río en los diferentes escenarios.
- Estudio de la influencia del oleaje en la hidrodinámica de la zona de estudio.
- Estudio del transporte local de sedimentos en la zona de estudio.

1.3 Estructura

El trabajo se organiza de la siguiente manera. La zona de estudio se describe en el 0, detallando la localización, descripción de los agentes, geomorfología y un resumen del análisis del clima marítimo realizado. En el 0 se describe la metodología que se ha seguido para implementar el modelo numérico además de especificar las características del modelo empleado junto con la delimitación y definición de las zonas delimitadas, “Puntos de Control”, el “Spline” correspondiente con el canal de navegación y los problemas encontrados a lo largo de la generación del modelo con las soluciones llevadas a cabo. En el Capítulo 4 se exponen todos los resultados analizados de las simulaciones, estructurados en tres bloques correspondientes con el estudio de la influencia de la descarga del río, la influencia del oleaje y el análisis del escenario de simulación de larga duración. Finalmente, las conclusiones de este trabajo se resumen en el Capítulo 5 y en el Capítulo 6 se definirán las futuras posibles líneas de trabajo. En el APÉNDICE A se detalla el análisis al completo que se ha realizado del clima marítimo.

CAPÍTULO 2

ZONA DE ESTUDIO

2.1 Situación y descripción

La desembocadura del río Guadiana se ubica en el límite suroeste de la Península Ibérica, en la provincia de Huelva y hace frontera con el Algarve portugués. Consiste en un largo y estrecho estuario confinado por las rocas de las formaciones paleozoicas de la Zona Subportuguesa acompañado de un amplio delta en su sector marino, donde el confinamiento rocoso se abre a la acción del oleaje. La morfología de la zona externa de la desembocadura está caracterizada por la existencia de una amplia flecha litoral en el margen portugués acompañada de marismas en la zona trasera además de varias líneas de islas barrera separadas por sedimentos mareales en la costa española, donde se desarrollan las marismas de Ayamonte e Isla Cristina. En cuanto a la morfología de la zona frontal del canal estuarino, se desarrolla un externo delta sumergido constituido por amplias plataformas sumergidas que se conocen localmente como “La Gola”

El sistema estuarino que conforma a la desembocadura del río Guadiana siempre ha sido caracterizado por ser considerado como una “unidad fisiográfica cerrada” debido a presentar el factor determinante en su morfología de un gran transporte de sedimentos desde la costa hasta la construcción del dique de encauzamiento del Guadiana en el año 1962, provocando un cambio en la dinámica del sistema.

Actualmente, dicha desembocadura conforma una unidad fisiográfica delimitada por las actuaciones de encauzamiento de los ríos dominado por el enfrentamiento dinámico entre la corriente fluvial y las mareas, produciendo un proceso de mezcla de aguas responsable de la sedimentación de material fino además de una descarga del material arenoso transportado en carga de fondo, en el que se pueden observar episodios de erosión, sedimentación y transporte de sedimentos a lo largo de la fachada litoral de toda la costa española y portuguesa adyacente. Dicha configuración es consecuencia del juego individual de factores físicos y de la interrelación existente entre los mismos, siendo dos agentes principales los que han modelado la morfología estuarina: la circulación de las masas de agua y el transporte de sedimentos.

Las numerosas definiciones de estuario coinciden en la existencia de dos zonas características bien diferenciadas; estuario exterior, donde se conjugan los factores de dinámica y sedimentación litoral; y estuario interior, desde la desembocadura del río Guadiana hasta donde llega la influencia de las mareas (IMA, 1997).

2.2 Descripción de los agentes

La dinámica litoral y sedimentaria desencadenante de las formaciones costeras existentes en la bocana

del estuario del Guadiana es el resultado de la interacción de factores morfodinámicos diversos como el viento, oleaje, mareas, la influencia fluvial y la intervención humana mediante obras de ingeniería costera; los cuales serán desarrollados más adelante en el apartado de Clima marítimo.

Por otro lado, la dinámica y sedimentación en el canal interno del estuario dependen de algunos factores como son el comportamiento mareal y el régimen fluvial.

2.2.1.1 Comportamiento Mareal

El comportamiento mareal en el canal principal del Guadiana se representa con un modelo cíclico e ilustrativo de la circulación mareal en el interior del estuario (Morales González, 1997), dividido en tres fases:

- Primera fase. El repunte de bajamar llega a Vila Real 45 minutos antes de que se produzca la inversión de las corrientes. Esto implica que después de la llegada a Álamo de la máxima bajamar, sigue sin producirse el giro de las corrientes en la zona más externa mostrándose las corrientes más débiles en el sector entre Vila Real y Álamo, donde se produce la inversión de las corrientes de un modo más o menos simultáneo. Una hora y media más tarde del comienzo del ciclo, el repunte de bajamar se encuentra al Norte de Álamo, a más de 23 km al norte de la desembocadura.
- Segunda fase. Desde este momento, la llenante e inversión de las corrientes se dan simultáneamente ascendiendo durante hora y media unos 27 km. Ello significa que entre las localidades de Poramio y Álamo el repunte de bajamar supone un ascenso brusco en la energía de las corrientes de flujo y reflujo debido al enfrentamiento de éstas en una estrecha zanja. En dicha franja es donde se produce la descarga fluvial del material grueso. Tres horas después de comenzar el flujo, este se desplaza río arriba, reduciéndose el repunte de bajamar a una pequeña zona en la que las corrientes de reflujo se enfrentan a la corriente fluvial; situación que dura dos horas hasta que la pleamar llega a la entrada del estuario y comienza el semiciclo vaciante.
- Tercera fase. En el repunte de bajamar, se produce una divergencia de las corrientes de marea, lo que supone que cada vez sea menor el volumen de agua que se desplaza hacia la zona interna, ganando así importancia las corrientes fluviales. Así, el flujo mareal que había alcanzado Mértola se desplaza hacia las zonas meridionales. Entre las 6 y las 7 horas más tarde del comienzo del ciclo, el repunte de pleamar ha llegado a la zona de convergencia entre las corrientes. Desde ese momento comienza el reflujo que se mantiene durante 5 horas.

2.2.1.2 Régimen fluvial y aporte sólido del río

La desembocadura del río Guadiana es considerada como la fuente de sedimentos más importante a nivel nacional, debido a los grandes aportes sólidos a la costa, a pesar de las grandes regulaciones efectuadas en su cuenca en el territorio nacional en las últimas décadas (Da Silva Costa & Fraidias Amarillo, 1997).

En la propia desembocadura del río Guadiana se observan dos depósitos importantes de sedimentos: el primero son las marismas del río que van colmatándose; el segundo y mucho más importante, es el crecimiento del delta sumergido que absorbe gran cantidad de sedimento. (CEDEX, 2013).

Por lo tanto, se estima de gran importancia el conocimiento de dicho aporte, encontrándose diversos estudios abarcando y analizando dicha magnitud. El estudio realizado por la empresa HIDTMA (Enríquez Fernández, 2000) realiza un análisis de varios estudios previos donde se llega a la conclusión, usando los datos de transporte longitudinal, a la afirmación de optar el valor de 200.000-300.000 m³/año como la cifra más fiable para la estimación de los aportes netos de material arenoso del río Guadiana a las playas y bajos que se disponen alrededor de su desembocadura (CEDEX, 2013).

En cambio, la mayor parte del aporte arenoso del Guadiana tiene lugar de forma puntual. Esto implica que, en periodos de descarga media, la marea puede trabajar y transportar hacia el mar la totalidad de los sedimentos aportados por el río. Sin embargo, en los momentos de carga máxima instantánea, gran parte del sedimento arenoso puede quedar en el interior del estuario. Además, el gran represamiento desde la década de

los 60 de su cuenca de drenaje, con más de 40 embalses que regulan alrededor del 75% de la superficie, conlleva una importante disminución en el volumen de sedimentos aportado por el río, siendo de un valor medio aproximado de 100.000-150.000 m³/año (Morales González, 1997).

2.2.2 Comportamiento dinámico del estuario.

Analizados individualmente los factores que intervienen en el funcionamiento de la dinámica litoral y sedimentaria, se puede desarrollar el comportamiento del estuario. Dos agentes configuran la morfología estuarina: la circulación de masas de agua y el transporte de sedimentos.

2.2.2.1 Circulación de masas de agua

La circulación de las masas de agua en la zona del estuario del Guadiana depende de las corrientes de mareas, de la deriva litoral, de los fondos marinos y del oleaje como ya se ha mencionado anteriormente en varias ocasiones.

Existen varios modelos sobre el comportamiento de las aguas costeras. En el Estudio de Impacto Ambiental del Puerto Deportivo de Punta del Moral (1995) se presenta el modelo de Tejedor, L. (1986) en el que se consideran dos fases de circulación (flujo y reflujo,)

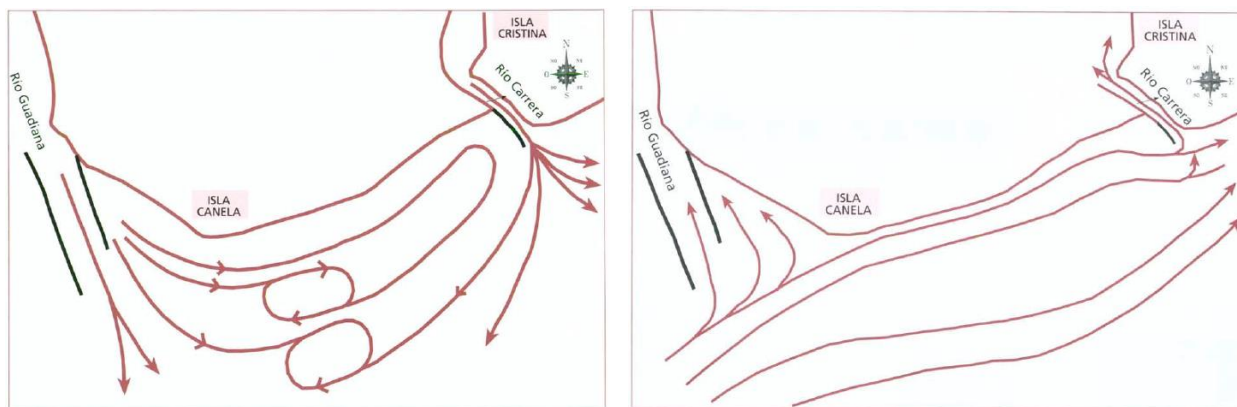


Figura 2.2-1. Circulación del estuario externo del Guadiana. Fase de flujo y reflujo. Modelo Tejedor, L. (1986) (José Fraidías Amarillo, 1997)

En el estado de flujo mareal existen tres vectores en la zona del estuario: una corriente de agua que proviene del exterior y entra en parte por el Guadiana, donde se propaga la corriente de marea; otro flujo se dirige en paralelo a la costa hasta alcanzar el río Carretas, penetrando la corriente en el mismo, dirigiéndose a Isla Cristina; y otro hacia el exterior y bordeando el banco de arena que existe frente a la playa de Isla Canela. En el estado de reflujo mareal, existen corrientes de agua desde ambos ríos hasta el Océano.

El desagüe del río Guadiana se realiza con dos corrientes: una parte se dirige hacia fuera con dirección SO, y otra hacia el E. Otra corriente que sale del Guadiana, con velocidad media y paralela a la costa, cambia de dirección por debilitamiento al llegar a las cercanías del dique.

Para el estudio de dichos procesos, el modelo propuesto por (Morales González, 1997) está basado en el estudio de las curvas de tiempo-altura y tiempo-velocidad realizadas simultáneamente en el canal estuarino y en el litoral (José Fraidías Amarillo, 1997). Los resultados de estos análisis le llevaron a plantear cuatro estadios de circulación ()

- Estadio A: desde 0h hasta 0h35'.

Comienza a producirse una inversión de la corriente en la zona externa, tomando el sentido E-O, dirección que se mantendrá durante todo el semiciclo de flujo. En el canal estuarino, se mantiene el reflujo de inercia, aunque las corrientes son de carácter muy débil (> 0.15 m/s). las corrientes de salida van perdiendo intensidad, mientras que gana la de flujo. Se produce a una altura de marea bastante baja (0.7-1 m sobre el nivel de Marea Baja Viva Equinoccial

(MBVE), de manera que los bajos arenosos aparecen emergidos y el refluo se encuentra para entonces, muy canalizado.

- Estadio B: desde 0h35' hasta 6h20'.

La corriente exterior tiene una dirección E-O mientras que el canal tiene un sentido entrante. La marea continúa creciendo, desde un metro hasta el momento de la pleamar, sumergiéndose los bajos durante el mismo.

- Estadio C: desde 6h20' hasta 6h35'.

Se invierte la corriente en el canal estuarino, mientras en la zona exterior se mantiene la corriente en sentido E-O debilitándose. La duración de este estadio es bastante breve, incluso en algunas circunstancias, puede llegar a no aparecer. La marea ha cubierto los bajos arenosos de la desembocadura.

- Estadio D: desde 6h35' hasta 12h35'.

La duración de este semiciclo es de 6h, las corrientes de refluo del estuario son coincidentes con las corrientes de la zona externa, en sentido O-E. Ambas corrientes tienen una velocidad elevada y los bajos llegan a aflorar.

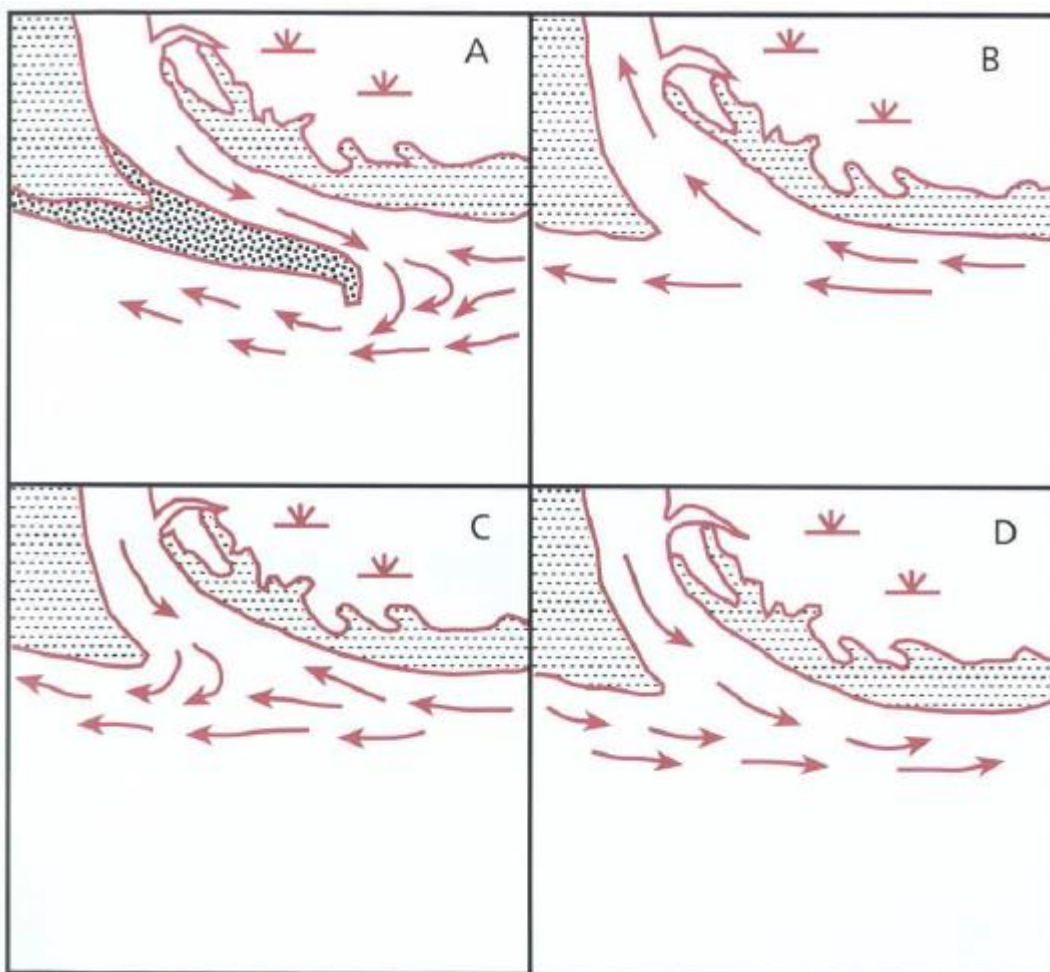


Figura 2.2-2. Estadios de circulación de las masas de agua en el estuario del río Guadiana. Modelo Morales, J.A. (1995) (José Fraidías Amarillo, 1997)

2.2.2.2 Deriva Litoral y Transporte de sedimentos.

Otro de los factores que intervienen en la circulación de las masas de agua y uno de los más discutidos

por los autores diferenciados es la deriva litoral. Para algunos, el transporte longitudinal de sedimentos producido por la deriva es la Fuente principal de sedimentos de la zona del estuario, además de los aportes fluviales que son arrastrados por el río.

Sin embargo, para otros autores la corriente de deriva litoral no es el factor determinante en la desembocadura del río, sino que la causa directa se debe a la interacción de las corrientes de flujo y reflujo del estuario. La evolución sedimentaria de la flecha occidental es producida por la actividad de la corriente transversal o deriva litoral que facilita el sedimento procedente de la costa portuguesa, siendo este rebajado por el oleaje. Sin embargo, la evolución del margen de levante es consecuencia de las corrientes mareales de flujo o reflujo, además de los trenes de olas.

Por último, otro factor importante en los procesos interactivos ocurientes en el estuario, tanto externo como interno, es la red de drenaje donde se propaga la onda mareal y donde se producen los intercambios de sedimentos y nutrientes.

Dentro de la red de drenaje es importante conocer la cuña de agua dulce y el gradiente de salinidad, ambos aspectos fluctuantes a lo largo de un ciclo anual y en las diferentes zonas del estuario. El grado de mezcla de ambos factores nos define el grado de estratificación de las aguas. El Guadiana se comporta como un estuario parcialmente estratificado, tanto en las mareas máximas como en las mínimas, pues durante el reflujo se comporta como un estuario parcialmente estratificado no llegando a los caudales mínimos (José Fraidías Amarillo, 1997).

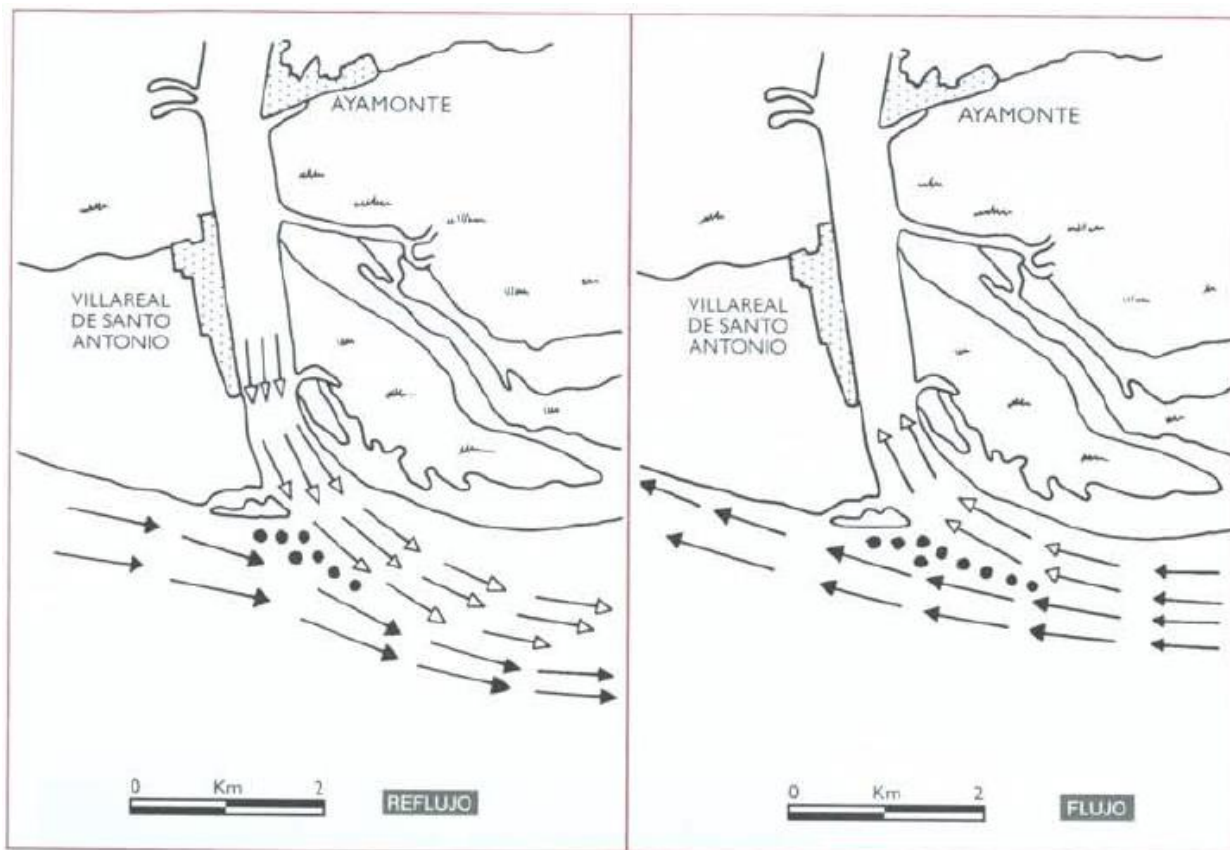


Figura 2.2-3. Circulación del flujo y reflujo mareal en el estuario del Guadiana. (Borrego, 1992) (José Fraidías Amarillo, 1997)

2.3 Geomorfología

2.3.1 Evolución histórica de la desembocadura

La costa onubense occidental se caracteriza ser una costa plana de gran extensión y amplitud, formada

a partir de grandes volúmenes de material arenoso de origen fluvial y marítimo. Es considerada como el tramo más arenoso del litoral español debido al gran aporte de material del río Guadiana en su desembocadura.

El material arenoso que conforma el litoral es, en casi su totalidad, de origen fluvial aportado por el río Guadiana en su desembocadura. Por lo tanto, este río, su regulación, caudal y aporte de sólidos, se corresponde con uno de los agentes o factores más importantes de la dinámica de la desembocadura y de las zonas costeras de toda la provincia de Huelva. Dicho aporte depende directamente del caudal de descarga y de la regulación del río a lo largo de su recorrido. Diferentes trabajos consultados aportan datos similares (Da Silva Costa & Fraidiás Amarillo, 1997).

Volumen de sedimentos fluviales	Fuente
712.000 Tn/año	Morales, J.A. (1995)
636.042 Tn/año	SEIA (1995)

Tabla 2.3-1. Volumen de sedimentos fluviales aportados a la región costera en la desembocadura del río Guadiana (Da Silva Costa & Fraidiás Amarillo, 1997)

Los intensos procesos de sedimentación del material aportado por el río han ido consolidando nuevos terrenos o elementos, creando frentes de barrera en escamas e incorporándose al litoral, haciendo favorable el crecimiento de la línea de costa. Además, el cauce sumergido del Guadiana origina en la orilla de levante un transporte neto de sedimentación, con dirección E-O, que parece coincidir con el sentido de crecimiento de las flechas litorales que limitan la marisma de San Bruno, que se ubican en el margen oriental de la desembocadura del Guadiana).

Los principales elementos morfológicos del estuario del río Guadiana son el banco externo, denominada también, “Outer Shoal”, una barra ascendente lateral, “Lateral Bar”, y un área compleja donde predomina la sedimentación, “Downdrift Complex Area” además del canal de navegación formado por el encauzamiento de la boca de la desembocadura, “Inlet Channel” (Figura 2.3-1).

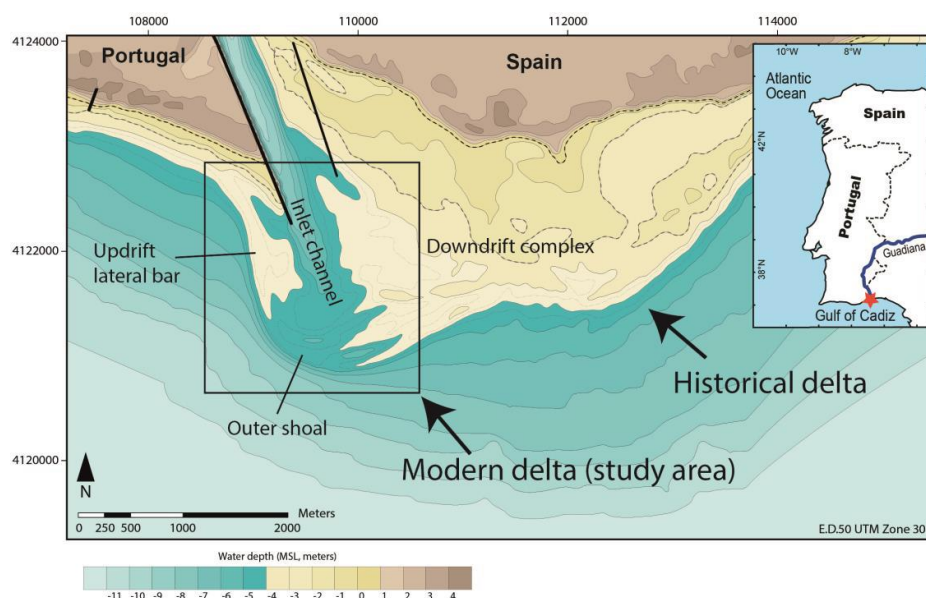


Figura 2.3-1. Representación topográfica y batimétrica del estuario del río Guadiana. Elementos morfológicos que lo componen (Garel E. , 2017).

A lo largo de la historia y previamente al año 1973, la desembocadura del Guadiana era ancha, asimétrica hacia el este y caracterizada por la presencia de un gran banco arenoso (Banco O’Brill) en el margen occidental de la misma. A lo largo del transcurso de las décadas, el banco fue atravesando periodos cíclicos de crecimiento, rotación y disminución que provocaba que el acceso al estuario fuera peligroso; por esta razón, se construyeron los diques paralelos entre los años 1972-1974 para la estabilización de dicha entrada al canal de navegación mejorando así su navegabilidad.

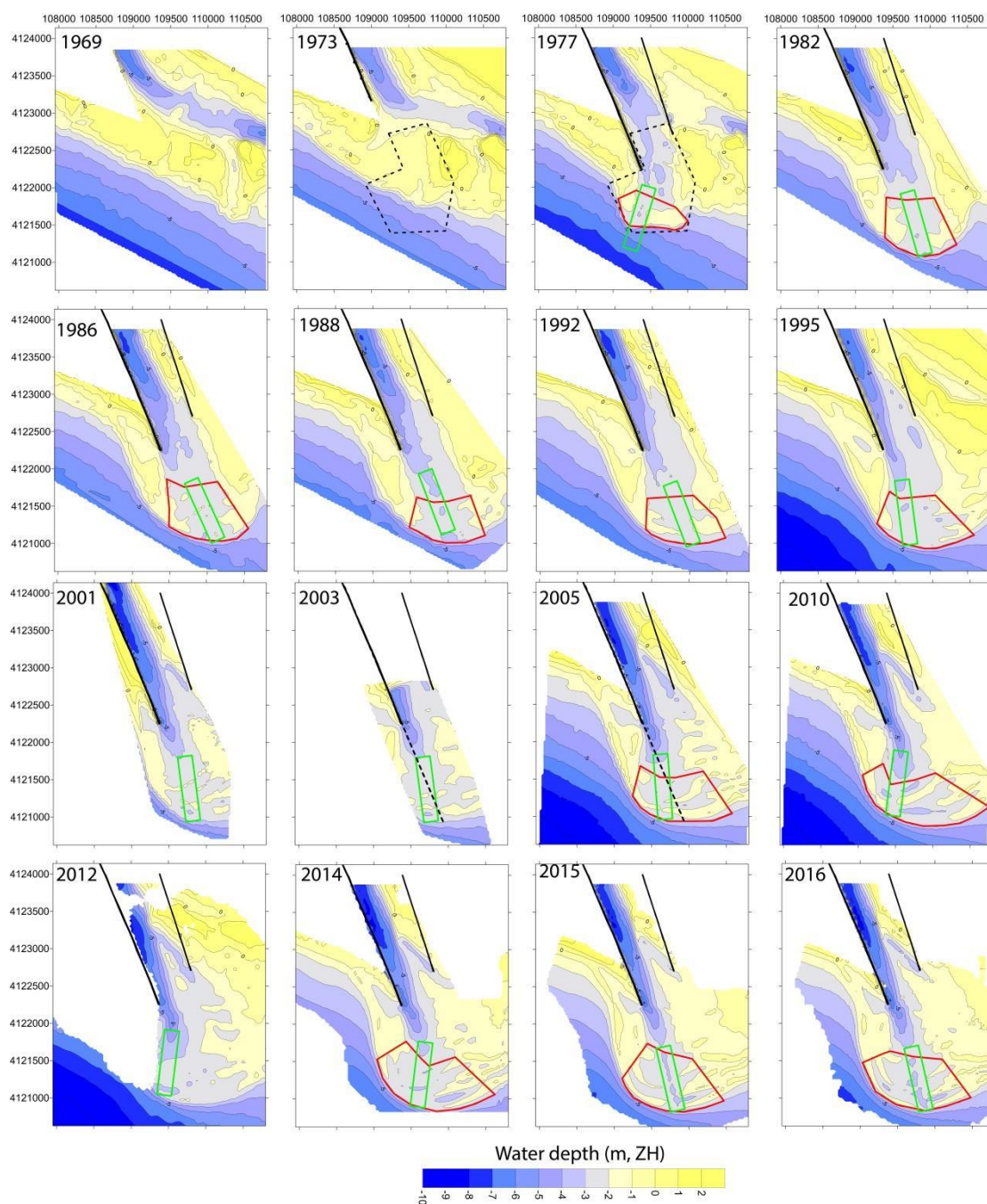


Figura 2.3-2. Evolución batimétrica del delta del Guadiana desde 1969 hasta 2016 con la localización del “Outer Shoal” (rojo) y canal de navegación (verde) (Garel E. , 2017).

La construcción de dichos diques paralelos provocó la modificación de la hidrodinámica de la zona comenzando una etapa de evolución rápida en su morfología y batimetría, desapareciendo la parte oriental del Banco O’Brill y apareciendo las zonas mencionadas anteriormente “Lateral Bar”, el “Outer Shoal” y la “Downdrift Complex Area”. Estas características morfológicas fueron generadas y desarrolladas rápidamente debido a una gran contribución con arena local del Banco O’Brill (Garel E. , 2017). El crecimiento de estos bajos era de bastante cuantía: en 16 años entre 1982 y 1998, se habían producido depósitos de prácticamente 577.000 m² lo que implica, que teniendo en cuenta la flecha que se aprecia en el lado portugués, el aumento anual de cerca de 50.000 m² (CEDEX, 2013).

Por lo tanto, llevando a cabo un análisis a lo largo de la historia de las formaciones y su evolución en la desembocadura, además de la comparación de diversos estudios consultados, cabe matizar que la tendencia del delta es ser formado por acumulaciones en forma de cordones o medias lunas en depósitos de sedimento los cuales siguen, con cierta aproximación, a la trayectoria media del transporte longitudinal de sedimentos; convirtiéndose en un futuro en los límites de los futuros canales mareales que se vayan produciendo.

La evolución de estos bajos también ha producido distorsiones en la línea de costa, formando un tómbolo frente al centro de la playa de Isla Canela y, como consecuencia de la absorción de arena, una importante erosión a levante que permite realizar la predicción de un estadio futuro próximo: la formación de una zona de marismas en frente de Isla Canela que tocará el dique de poniente de Isla Cristina dejando a la actual línea de orilla lejana. (CEDEX, 2013).

Por lo tanto, la zona de estudio en la que se centra este proyecto se puede caracterizar como una zona que no se encuentra en equilibrio y donde las modificaciones morfológicas se dan a una velocidad elevada debido a la construcción de los diques paralelos. El gran aporte de sólidos del río produce la generación de depósitos en su zona más próxima a la descarga, dándose una dinámica importante en transporte de sedimentos y en generación de corrientes debido a las mareas, además, de posibles problemas que podrían aparecer.

Estos problemas que pueden aparecer se centran en:

- Conflicto en la salida del río Carreras, Isla Cristina, entre el transporte de sedimentos y el uso portuario. lo que justifica las operaciones de dragado realizadas en 1987 y 2015 (Garel E. , 2017).
- Lugares de concentración de energía y lugares de abrigo de energía debido a los bajos.
- Reducción de aportes sólidos del río a la costa adyacente por la posible absorción de éstos por las zonas futuras de marismas, por lo que el transporte de sedimentos tendería al cierre de la desembocadura del río.
- Reducción del transporte longitudinal en el tramo del delta con una tendencia erosiva en el tramo contiguo.

2.4 Clima marítimo

La hidrodinámica del estuario del río Guadiana y su entorno está influenciada por los agentes climáticos. En esta sección, se procede a la descripción de los principales: oleaje y viento, ambos en régimen medio y extremal, y las variaciones del nivel del mar además del aporte fluvial del río Guadiana.

2.4.1 Datos de partida

En el Golfo de Cádiz se encuentra la “Boya del Golfo de Cádiz”, con un gran volumen de datos a disposición y frecuencias de muestreo excelentes. Sin embargo, por su lejanía a la zona de estudio, se ha optado por tomar los datos de un punto SIMAR más cercano, concretamente, el punto “SIMAR5026021” (7, 33° W; 37,00° N), facilitado por Puertos del Estado (Ministerio de Fomento). El conjunto de datos de este punto contiene las estimaciones diarias de oleaje (modelo WAM) y viento (modelo HIRLAM) desde 1958.

Otra fuente de información de los datos de armónicos de marea es el mareógrafo “Huelva 5”, de la red de mareógrafos de Puertos del Estado. La elección de este mareógrafo se sustenta en ser el que se encuentra más cercano a la zona de estudio, instalado en el Puerto Deportivo de Mazagón (37°07’55,27” N; 006° 50’ 01,28” W).

El análisis del clima marítimo se ha realizado tanto para el oleaje como para el viento de forma general en profundidades indefinidas, régimen medio y régimen extremal además de las variaciones del nivel del mar.

2.4.2 Descripción general del oleaje y viento en profundidades indefinidas

En el Golfo de Cádiz se produce una clara predominancia de los oleajes comprendidos en el sector SW-N, encontrándose dicha zona parcialmente expuesta a las intensas borrascas de componentes N y NW. en cambio, debido a la alineación de la costa, estos oleajes del cuarto cuadrante no tienen apenas incidencia en la

costa más occidental de la provincia de Huelva, por lo que son los temporales del tercer cuadrante los que controlan de forma más acentuada los procesos litorales en este tramo. (Cistina Aguilar Correa, 2016).

Se han representado tanto un diagrama de la altura de ola como de la velocidad del viento respecto al tiempo durante el periodo en el cual existen datos (1958-2017) (Figura 2.4-1 y Figura 2.4-2 respectivamente).

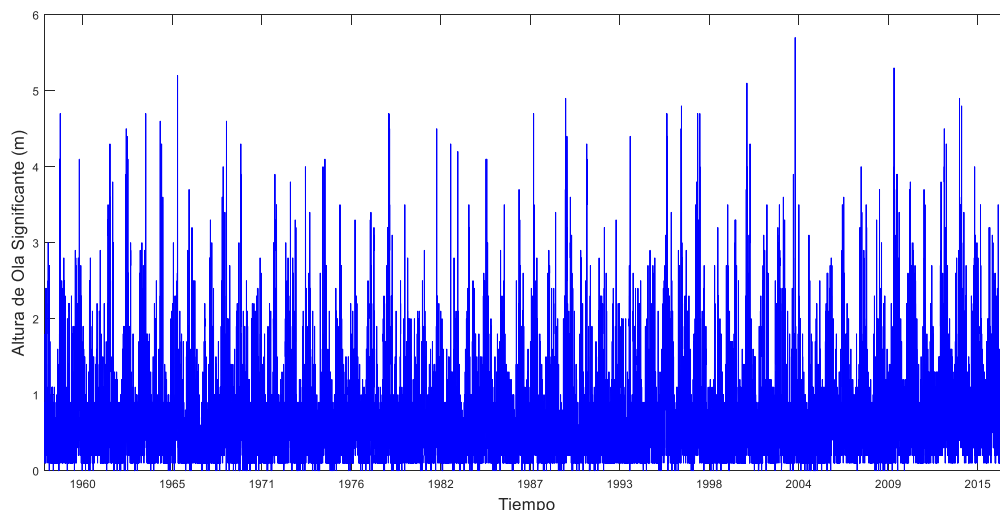


Figura 2.4-1. Serie temporal de altura ola en "SIMAR5026021".

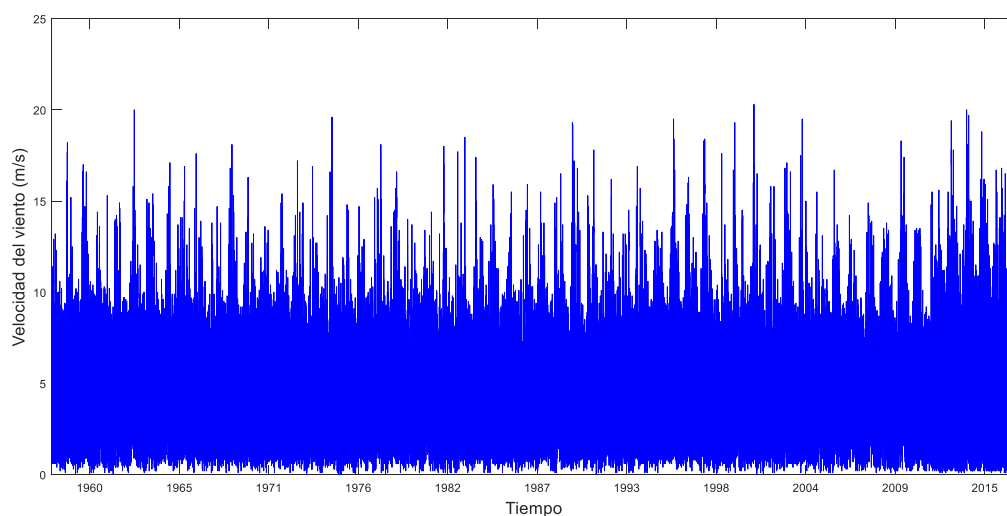


Figura 2.4-2. Serie temporal de velocidad del viento "SIMAR5026021".

Para el conocimiento de los combinaciones de clima y de viento más frecuentes se han obtenido diagramas de dispersión que relacionan sus variables más representativas. En cuanto al oleaje, se han representado diferentes diagramas de dispersión que relacionan las variables de altura de ola significativa (H_s), periodo de pico (T_p) y dirección media de procedencia de este (θ). En cuanto al viento, se relacionan la velocidad del viento (V_v) y su dirección (θ_v).

Por otro lado, dichas variables también se representan mediante histogramas y rosas de oleaje y viento, lo que permite de una forma fácil y sencilla apreciar cuáles son las alturas de ola, periodos, direcciones medias de procedencia, velocidades y direcciones de viento predominantes en la zona de estudio. Todas esas gráficas mencionadas junto con la descripción general del oleaje y del viento en profundidades indefinidas se agrupan en el Apéndice A. Para finalizar, y a modo de resumen y representativo del análisis realizado en dicho apéndice, se presentan las rosas de oleaje y viento (Figura 2.4-3 y Figura 2.4-4 respectivamente) además de unas conclusiones.

Los resultados a destacar de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Alturas de ola con valores entre 0 y 6 m.
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.1 y 1 m.
- El rango de periodos de pico entre 2 y 21 s.
- Los periodos de pico más frecuentes tienen valores comprendidos entre 4 y 6 s.
- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es WSW.

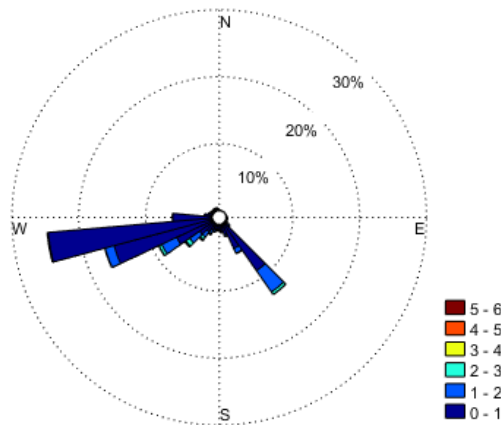


Figura 2.4-3. Rosa de oleaje en "SIMAR5026021".

Los resultados a destacar de la descripción general del viento en profundidades indefinidas son:

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 21 m/s.
- Las velocidades de viento más frecuentes están entre 4 y 6 m/s.
- Las direcciones de precedencia media de viento más frecuentes son NNW y SW.

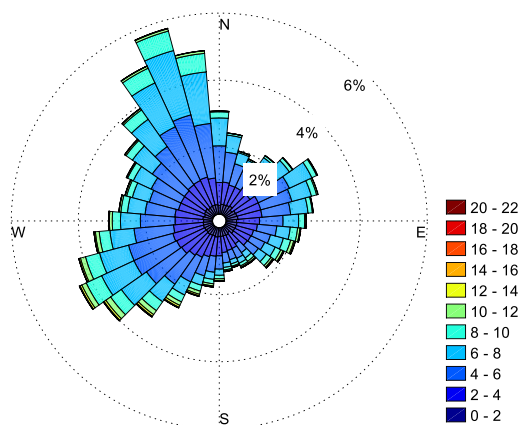


Figura 2.4-4. Rosa de viento en "SIMAR5026021".

2.4.3 Régimen medio

Se analiza para todas las direcciones, el régimen medio en profundidades indefinidas para la altura de ola significativa (H_s) y velocidad del viento (V_p).

Dicho análisis incluye:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad de Weibull.
- Ajuste de los datos a una función de distribución Weibull.
- Tabla resumen con resultados parciales.

Probabilidad de no excedencia	Altura de ola significativa (m)
50%	0.45 m
85%	1.05 m

Tabla 2.4-1. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola en "SIMAR5026021".

Probabilidad de no excedencia	Velocidad del viento (m/s)
50%	4.8
85%	7.6

Tabla 2.4-2. Tabla resumen del régimen medio para la velocidad del viento en "SIMAR5026021".

2.4.4 Régimen extremal

Para obtener el régimen extremal se ha aplicado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Se ha establecido la altura de ola y velocidad del viento umbral correspondiente al valor que es superado en la serie histórica disponible en menos del 1%. Por otro lado, para garantizar la independencia estadística entre sucesos (temporales), se ha supuesto que la duración mínima entre los mismos debe ser superior a 48 horas en los 58 años meteorológicos analizados.

En cada análisis se obtiene un número de eventos extremales para los cuales se analiza:

- Ajuste de los datos a una función de densidad de probabilidad generalizada de valores extremos (GEV). El empleo de esta función presenta la ventaja de que dependiendo del valor que tomen los parámetros de dicha función, automáticamente se convierte en una Gumbel, Frechet o Weibull.
- Ajuste los datos a una función de distribución generalizada de valores extremos.
- Tabla resumen de los resultados parciales.

En el análisis del oleaje, para la obtención del régimen extremal se ha fijado una altura de ola umbral de 2.7 m con el cual, se han obtenido 245 eventos extremales en los 58 años meteorológicos analizados.

Teniendo en cuenta únicamente los valores de altura de ola en esos 245 eventos extremales, se obtiene los siguientes valores de alturas de ola asociados a probabilidad de no excedencia de un 50 y 85%.

Probabilidad de no excedencia	Altura de ola significativa (m)
50%	3.1 m
85%	3.8 m

Tabla 2.4-3. Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola en "SIMAR5026021".

En el caso del viento, se ha fijado una velocidad del viento umbral de 11.8 m/s y se han obtenido 950 eventos extremales en los 58 años meteorológicos.

Probabilidad de no excedencia	Velocidad del viento (m/s)
50%	13.3
85%	15.5

Tabla 2.4-4. Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad del viento en “SIMAR5026021”.

2.4.5 Variaciones del nivel del mar

La hidrodinámica en las zonas costeras y estuarinas está fuertemente condicionada e influenciada por las variaciones del nivel del mar que se producen a distintas escalas temporales (Dean, 2001). De acuerdo con (Dean, 2001), uno de los procesos geológicos que más importancia tienen en la costa a largo plazo es la variación relativa del nivel del mar, que puede producirse como un cambio en el volumen de agua de los océanos o hundimiento o afloramiento del terreno en procesos geológicos. En este caso, las variaciones del nivel del mar a largo plazo se han despreciado debido a la escala temporal del estudio. Además de los mecanismos a largo plazo, hay otros forzamientos a corto plazo, que son los efectos de las tormentas, oleaje, corrientes y viento. Estos últimos actúan comúnmente en periodos de segundos, horas y días, más que periodos de años o décadas.

Los cambios del nivel del mar debido a forzamientos a largo plazo pueden tener variaciones de milímetros al año, mientras que los cambios de nivel causados por las mareas astronómicas pueden llegar a ser del orden de metros por hora al igual que en el caso de las tormentas, y por el oleaje de metros por segundo (Dean, 2001). Por otro lado, el nivel de marea se puede definir como el nivel del mar sin tener en cuenta la acción del paso de olas individuales, y resultado de considerar la marea astronómica y la meteorológica.

En la Figura 2.4-5 se representa la marea astronómica y meteorológica de los datos disponibles en el mareógrafo Huelva 5, resultando su suma como el nivel del mar a lo largo del tiempo.

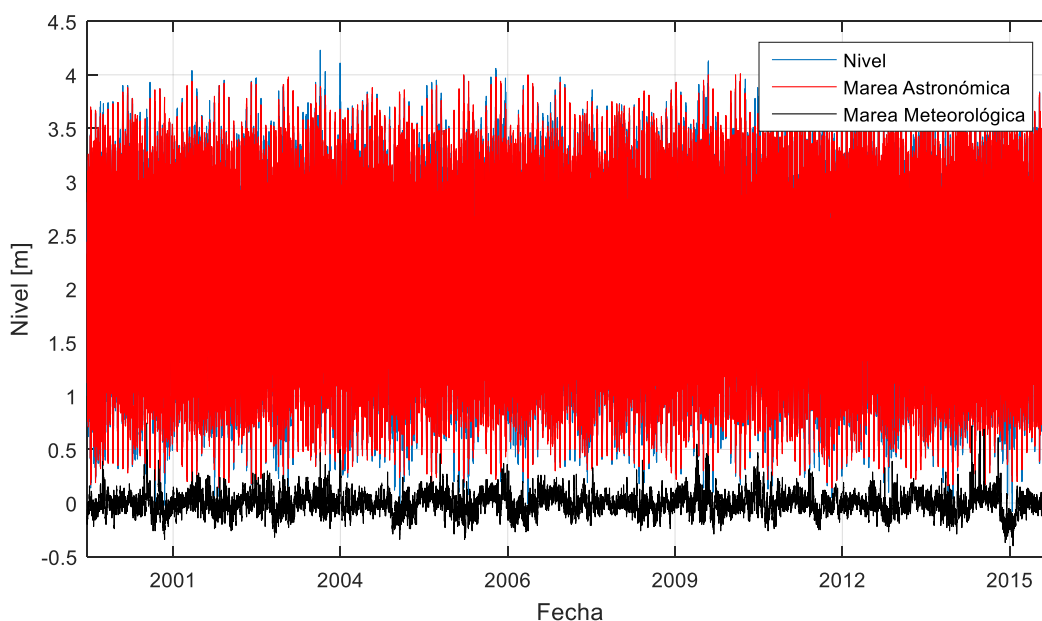


Figura 2.4-5. Nivel del mar, marea astronómica y marea meteorológica en REDMAR Huelva 5.

2.4.5.1 Marea astronómica

La marea astronómica es de carácter determinista y se define como la oscilación periódica del nivel del mar inducida por fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas de agua en la superficie de la Tierra. Es un fenómeno periódico muy complejo pero predecible, con distintas frecuencias según la componente de marea que se estudie. Es el resultado de la combinación de cuatro fuerzas actuantes:

- Gravedad de la Tierra
- Gravedad de la Luna
- Gravedad del Sol
- Fuerza centrífuga de rotación del sistema Luna-Tierra.

Descomponemos la marea astronómica representada en la Figura 2.4-6 en componentes armónicos reflejados en la Tabla 2.4-5. Estos son los más significantes y son los que se han impuesto como condiciones de contorno abiertas en el modelo del tipo de nivel con forzamiento astronómico.

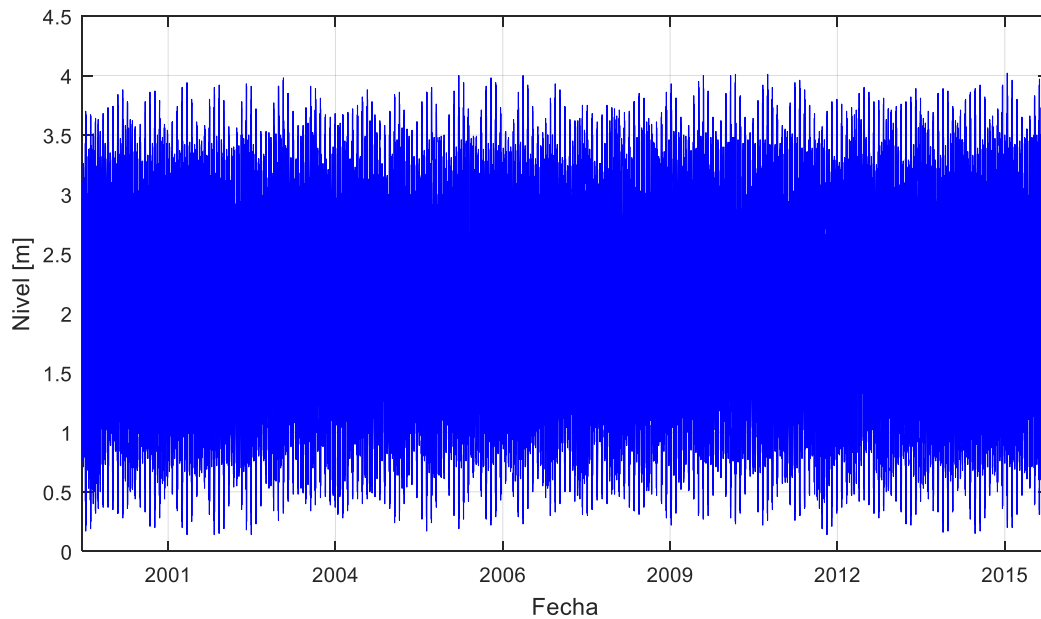


Figura 2.4-6. Marea astronómica a lo largo del tiempo en REDMAR Huelva 5.

Armónico	Frecuencia	Amplitud	Fase (°)
SSA	0,0002	2,91	287
O1	0,0387	5,74	10,8
K1	0,0418	6,6	72,89
MU2	0,0777	3,49	184,73
N2	0,0790	19,92	189,32
NU2	0,0792	3,64	147,9
M2	0,0805	97,26	143,56
S2	0,0833	36,95	88,92
K2	0,0836	11,02	310,86

Tabla 2.4-5. Armónicos de marea (Mareógrafo Huelva 5)

2.4.5.2 Marea meteorológica

La marea meteorológica es de tipo aleatorio y se define como la oscilación del nivel del mar inducida por la acción de gradientes de presión atmosférica (marea barotrópica), por la tensión tangencial del viento sobre la superficie de agua o por la sobreelevación producida por el oleaje en la zona de rompientes (setup). En este estudio se ha despreciado la componente resultante de la acción de gradientes de presión atmosférica, debido a la escala espacial del mismo y la complejidad que supone incorporarla al modelo numérico.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Modelo numérico

3.1.1 Módulo FLOW

El módulo Delft3D-FLOW es el encargado de proporcionar, en concreto al WAVE, la base hidrodinámica al resto de los módulos del programa. Simula el flujo y el transporte en aguas someras obtenidos del forzamiento meteorológico Y/o mareas teniendo en cuenta los siguientes procesos:

- Efecto Coriolis por la rotación de la Tierra.
- Gradientes en la superficie libre debido a los efectos barotrópicos.
- Agua con densidad variable.
- Forzamientos de mareas en contornos abiertos.
- Modelos de turbulencia.
- Efectos producidos por la tensión cortante que genera el viento sobre la superficie libre del mar.
- Esfuerzos cortantes sobre el fondo.
- Presión atmosférica sobre la superficie del mar variable en el espacio y el tiempo.
- Fuerzas generadas por las mareas.

Con este módulo se obtienen los niveles, la distribución de salinidad y temperatura, el campo de velocidades, las tensiones sobre el fondo, el transporte de sedimentos y la evolución del fondo para distintas aplicaciones.

Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible bajo la hipótesis de aguas someras y las hipótesis de Boussinesq (Deltares, 2011). A continuación, se presenta una breve descripción de las ecuaciones de profundidad promediada que gobiernan el modelo hidrodinámico, más detalles pueden encontrarse en (Lesser, 2004).

La ecuación de continuidad despreciando los efectos de la precipitación y de la evaporación es

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial |h\bar{u}|}{\partial x} + \frac{\partial |h\bar{v}|}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

donde \bar{u} y \bar{v} son las velocidades en profundidades promediadas en las direcciones x e y (ms^{-1}) respectivamente; h la profundidad (m) y ξ el nivel de la superficie libre (m).

Las ecuaciones de momento horizontal en profundidad promediada, asumiendo una ley de fricción cuadrática, velocidad nula y condiciones de contorno de deslizamiento libre (esfuerzo tangencial nulo) en el terreno; despreciando el efecto de Coriolis y del viento se escriben

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{g \bar{u} [\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}]}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{g \bar{v} [\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}]}{C^2 h} - v \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad (ms^{-2}), v la velocidad de turbulencia (m^2s^{-1}) y C el coeficiente de Chézy ($m^{\frac{1}{2}}s^{-1}$). El coeficiente de Chézy se define como

$$C = 18 \log 12h/k_s \quad (4)$$

donde k_s es la rugosidad de la escala longitudinal Nikuradse (Cistina Aguilar Correa, 2016).

Por otro lado, el módulo mencionado permite simular el transporte de sedimentos dando la posibilidad de elegir tanto su forma de transporte, suspendido o de fondo, como el tipo de sedimento, cohesivo o no cohesivo. El método predeterminado que usa Delft3D está asociado a las fórmulas de Van Rijn (Rijn, 1993) pudiéndose especificar otro tipo de formulaciones.

Las fórmulas del método de Van Rijn utilizadas en este proyecto distinguen las siguientes componentes del transporte de fondo:

- Carga de fondo debido a la corriente (S_{bc}).
- Carga de fondo debido al oleaje (S_{bw}).
- Carga suspendida debido a las olas (S_{sw}).

Las fórmulas del método Van Rijn distinguen entre la carga de fondo y la de suspensión mediante la altura de referencia a . La concentración de la carga de fondo es calculada según el módulo FLOW de Delft3D a partir del método de Van Rijn es:

$$S_b = 0.006 \rho_s w_s D_{50} M^{0.5} M_e^{0.7} \quad (5)$$

- S_b : Concentración de la carga de fondo.
- ρ_s : Densidad del sedimento.
- w_s : Velocidad de asentamiento para material no cohesivo.
- D_{50} : Tamaño medio del material erosionable.
- M : Número de movilidad del sedimento debido al oleaje.
- M_e : Número de movilidad del sedimento excedente.

3.1.2 Módulo WAVE

El módulo Delft3D-WAVE es el módulo encargado de la propagación del oleaje con el que se puede simular los principales procesos de este entre profundidades indefinidas y la costa. Con este módulo se implementa el modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore), el cual es reconocido y usado a nivel internacional para su aplicación en proyectos ingenieriles y de investigación, y con el que se obtienen características del oleaje en aguas intermedias y reducidas además del aumento de nivel provocado por la rotura del mismo (set-up).

Dicho modelo ha sido desarrollado para su aplicación en estuarios, desembocaduras, zonas costeras, lagos y embalses, simulando los siguientes procesos:

Generación del oleaje por viento.

- Refracción y asomeramiento del oleaje durante su propagación sobre un fondo de profundidad variable y/o presencia de corrientes.
- Difracción.
- Transmisión, bloqueo o reflexión del oleaje en presencia de obstáculos.
- Interacciones no lineales ola-ola y ola-corriente.
- Disipación de energía por decrestamiento, rotura por profundidad y fricción con el fondo mediante tres formulaciones distintas.

En SWAN se describe el oleaje mediante el espectro bidimensional de densidad de acción $N(\sigma, \theta)$ en vez del espectro de densidad de energía $E(\sigma, \theta)$ debido a que, en presencia de corrientes, se cumple que la densidad de acción se conserva mientras que la densidad de energía no (Whitham, 1974). Por lo tanto, la evolución de la energía del oleaje es descrita por la ecuación espectral de balance de la acción $N(\sigma, \theta)$, siendo σ la frecuencia y θ la dirección de propagación, a partir de las condiciones arbitrarias de viento, corrientes y batimetría. La densidad de acción es igual a la densidad de energía dividida por la frecuencia relativa $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$. En SWAN, este espectro puede variar en tiempo y espacio.

La evolución del espectro de onda se describe mediante la ecuación de equilibrio de acción espectral que para coordenadas cartesianas es (Hasselmann, 1973):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (6)$$

El primer término representa la evolución local a lo largo del tiempo de la densidad de la acción, el segundo y tercero representan su propagación en el ámbito y espacio geográfico con velocidades de propagación C_x y C_y . El cuarto término representa los cambios de la frecuencia relativa debido a las variaciones de la batimetría y las corrientes, siendo C_σ la velocidad de propagación en el espacio σ . En cuanto al quinto término, representa la refracción del oleaje producida por los cambios de profundidad y corrientes con velocidad de propagación C_θ en el espacio θ .

En cuanto al término que se encuentra al otro lado, $S = S(\sigma, \theta)$, es el término Fuente de energía y está compuesto por el sumatorio de varios términos:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds,w} + S_{ds,br} + S_{ds,b} \quad (7)$$

S_{in} : Transferencia de energía al oleaje debido al viento.

S_{nl} : Interacciones no lineales entre olas.

$S_{ds,w}$: Disipación de energía en aguas profundas debido al decrestamiento.

$S_{ds,br}$: Término debido a la rotura por disminución de la profundidad.

$S_{ds,b}$: Disipación de energía por fricción en el fondo.

3.2 Escenarios de simulación

3.2.1 Temporales

Para la realización de las distintas simulaciones que abarcan este Trabajo de Fin de Máster, se han seleccionado varios temporales o estados. La simulación de estos temporales se ha llevado a cabo con la misma batimetría y parámetros del modelo (descritos en el Apartado 3.3) para realizar una comparación coherente entre los mismos y bajo las mismas condiciones.

Se han seleccionado cuatro combinaciones de clima. Tres de ellos corresponden a temporales cuyas direcciones de procedencia son las más frecuentes a lo largo de la serie histórica de datos disponibles en la Red de Mareógrafos y Boyas de Puertos del Estado, además de una combinación de clima probable de calma. Los criterios y las condiciones establecidas para llevar a cabo dicha selección han sido los siguientes:

- Duración mínima de 72 h.
- Altura de ola pico mayor que la altura de ola con una probabilidad del 1% de ser superada en dicha dirección de procedencia.
- Disponibilidad de datos de oleaje y viento.

3.2.1.1 Temporal 1 WSW

El primer temporal seleccionado se corresponde con la combinación de clima cuya la dirección de procedencia del oleaje es más predominante, WSW. Tiene una duración de 101 horas abarcando desde las 11:00 h del 7/04/2008 hasta las 16:00 h del 11/04/2008. La altura de ola pico es de 3.5 m, siendo mayor que el umbral seleccionado, se 1.7 m.

A continuación, se grafica la altura de ola y dirección media de procedencia del oleaje (Figura 3.2-1) además de la velocidad y la dirección del viento (Figura 3.2-2) a lo largo de la ocurrencia del Temporal 1.

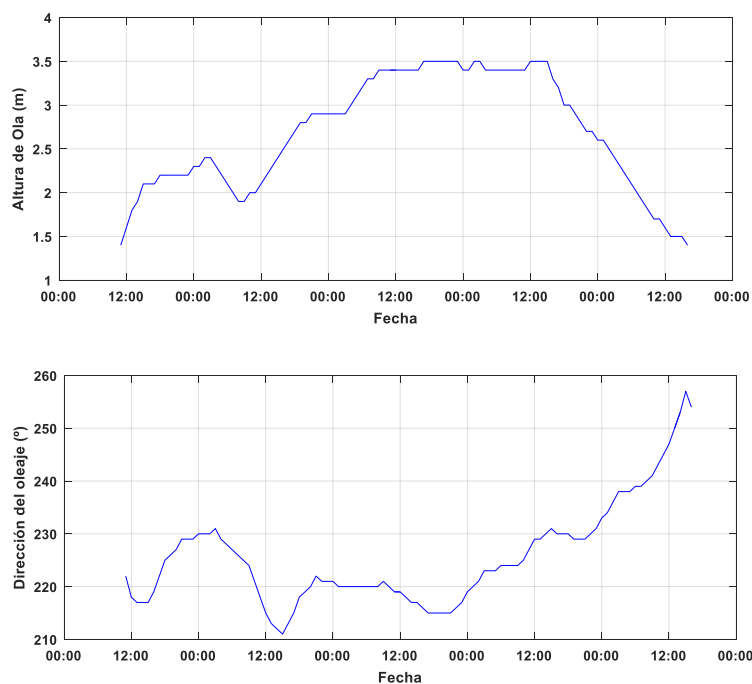


Figura 3.2-1. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Temporal 1

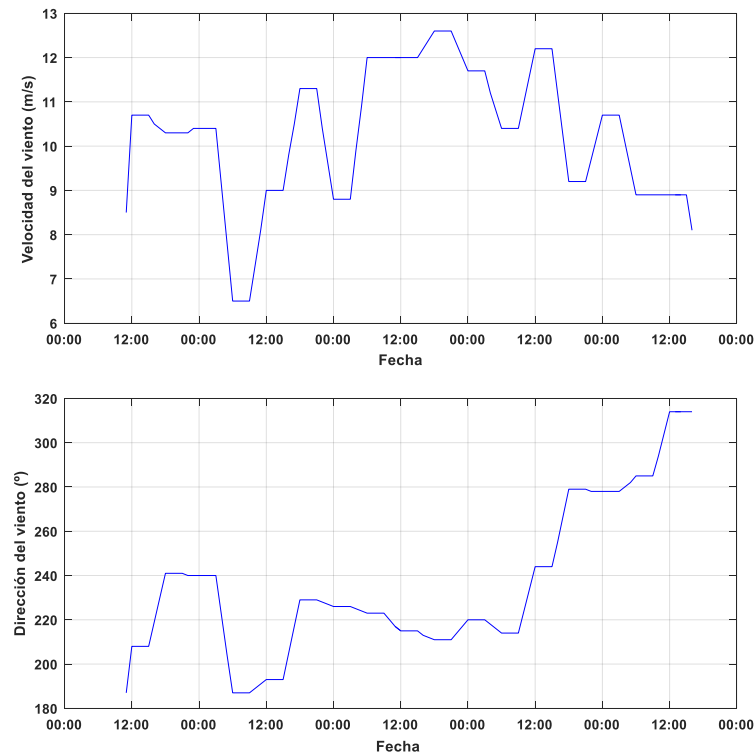


Figura 3.2-2. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Temporal 1.

3.2.1.2 Temporal 2 SW

El segundo temporal seleccionado corresponde con la segunda dirección más predominante de procedencia del oleaje, SW. Tiene una duración de 108 horas abarcando desde las 21:00 h del 1/01/2017 hasta las 09:00 h del 06/01/2017. La altura de ola pico es de 3.2 m, siendo mayor que el umbral seleccionado, se 0.7 m. A continuación, se grafica la altura de ola y dirección media de procedencia del oleaje (Figura 3.2-3) además de la velocidad y la dirección del viento (Figura 3.2-4) a lo largo de la ocurrencia del Temporal 2.

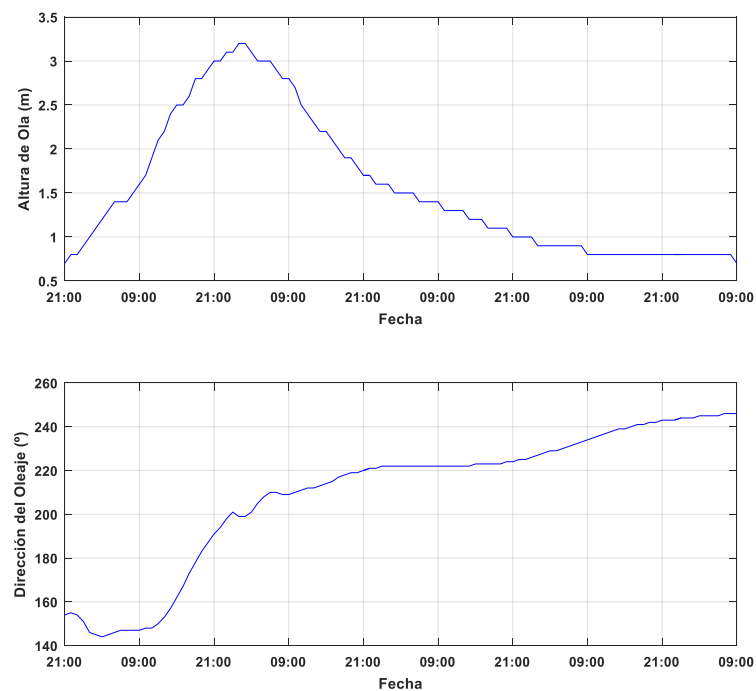


Figura 3.2-3. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Temporal 2

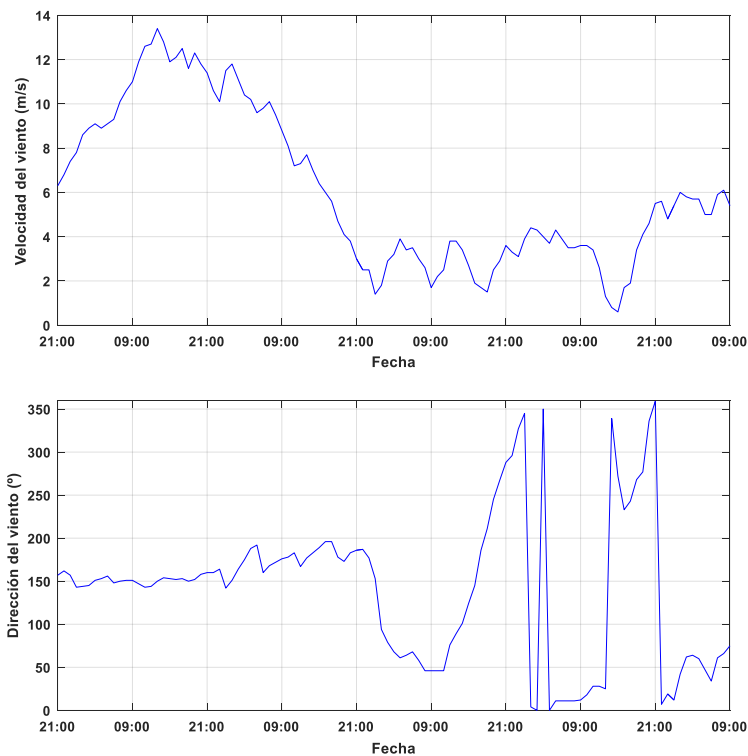


Figura 3.2-4. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Temporal 2.

3.2.1.3 Temporal 3 SE

El segundo temporal seleccionado corresponde con la segunda dirección más predominante de procedencia del oleaje, SE. Tiene una duración de 72 horas abarcando desde las 01:00 h del 15/01/2016 hasta las 01:00 h del 18/01/2016. La altura de ola pico es de 1.9 m, siendo mayor que el umbral seleccionado, se 0.6 m.

A continuación, se grafica la altura de ola y dirección media de procedencia del oleaje (Figura 3.2-5) además de la velocidad y la dirección del viento (Figura 3.2-6) a lo largo de la ocurrencia del Temporal 3.

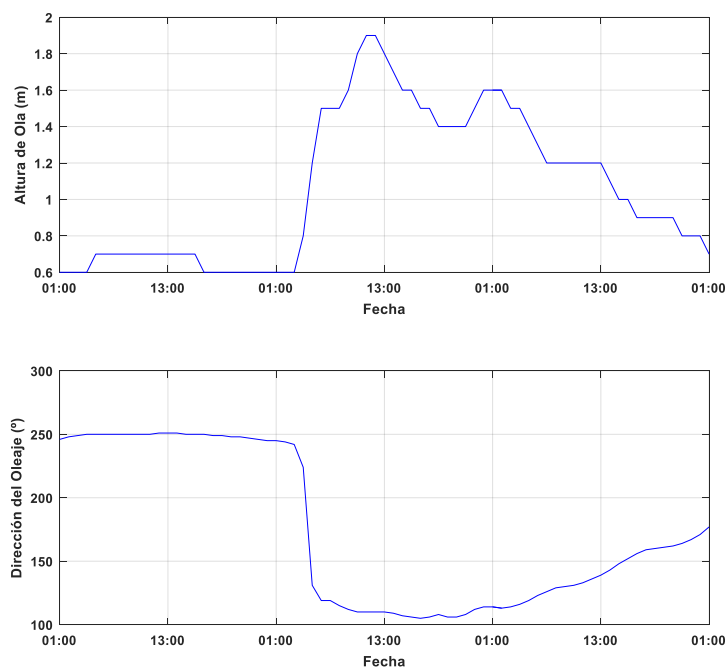


Figura 3.2-5. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Temporal 3

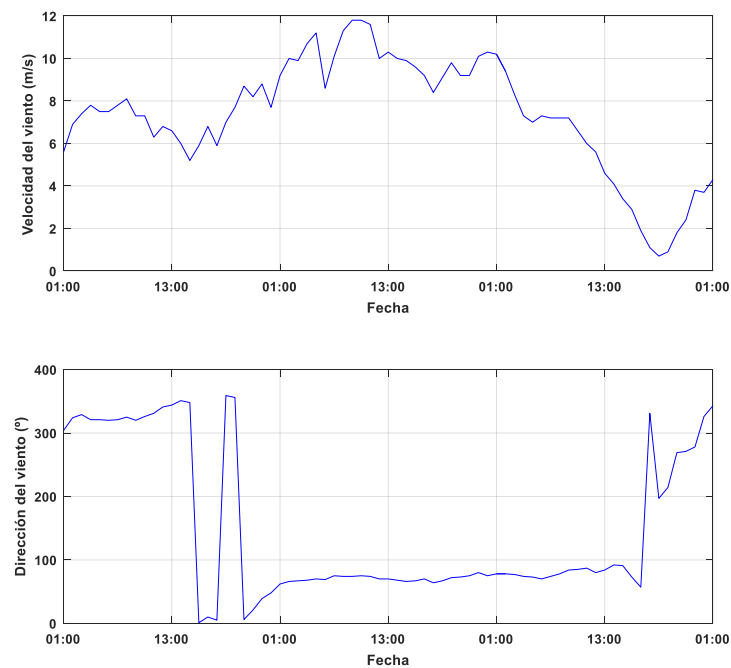


Figura 3.2-6. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Temporal 3.

3.2.2 Estado de Calma

El cuarto estado seleccionado se corresponde con las condiciones probables de clima marítimo en condiciones de calma, donde se dan alturas de ola comprendidas entre 0 y 1 m y con un abanico amplio de direcciones de procedencia del oleaje. Tiene una duración de 73 horas abarcando desde las 08:00 h del 28/01/2017 hasta las 09:00 h del 31/01/2017.

A continuación, se grafica la altura de ola y dirección media de procedencia del oleaje (Figura 3.2-7) además de la velocidad y la dirección del viento (Figura 3.2-8) a lo largo de la ocurrencia del Estado de Calma.

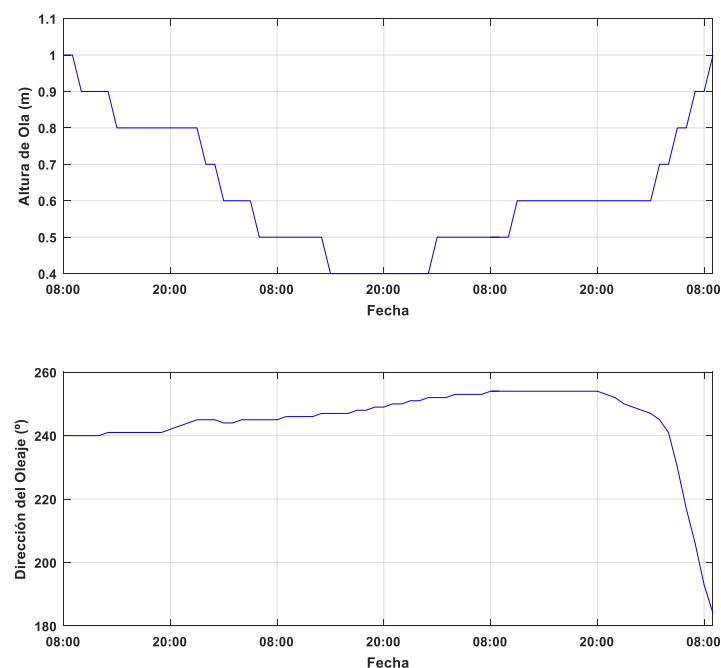


Figura 3.2-7. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Estado de Calma

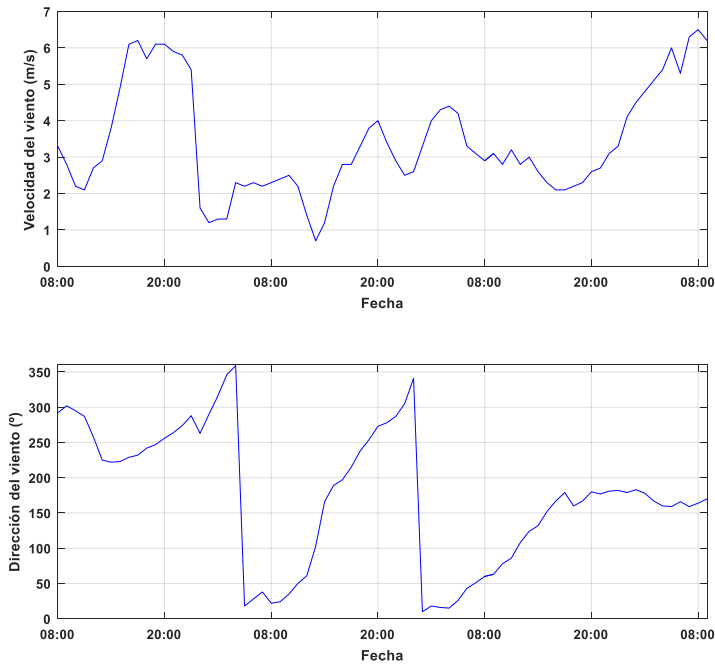
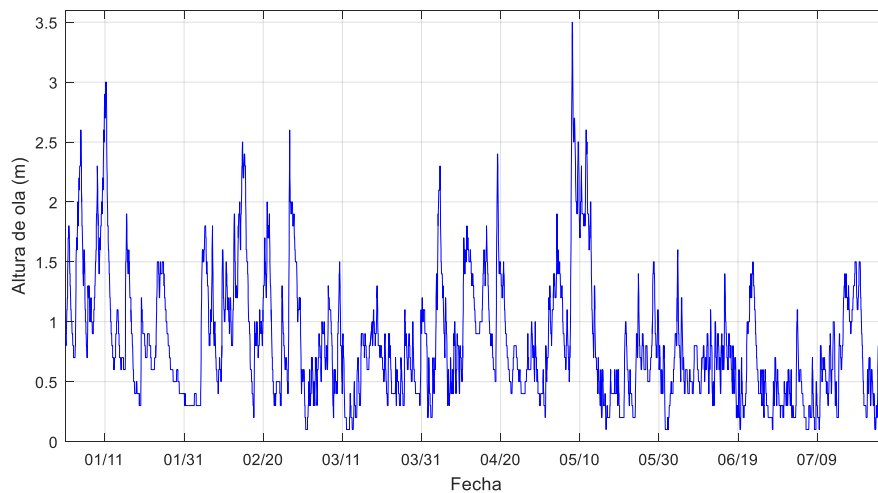


Figura 3.2-8. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Estado de Calma

3.2.3 Simulación de Larga duración

Por otro lado, y para finalizar, se ha seleccionado un escenario de simulación que abarca casi los siete primeros meses del año 2016, año del cual procede la batimetría. Esta simulación abarca desde las 00:00 h del día 01/01/2016 hasta las 16:00 h del 26/07/2016 con oleaje de altura media 0.60 m que llegan hasta valores de 3.5 m con el abanico completo de direcciones de procedencia.

En cuanto a la acción del viento, se observa una gran acción de dicho agente con una velocidad media de 5 m/s llegando a medirse velocidades de hasta 20 m/s, al igual que el oleaje, con una gran variedad de direcciones de procedencia del mismo.



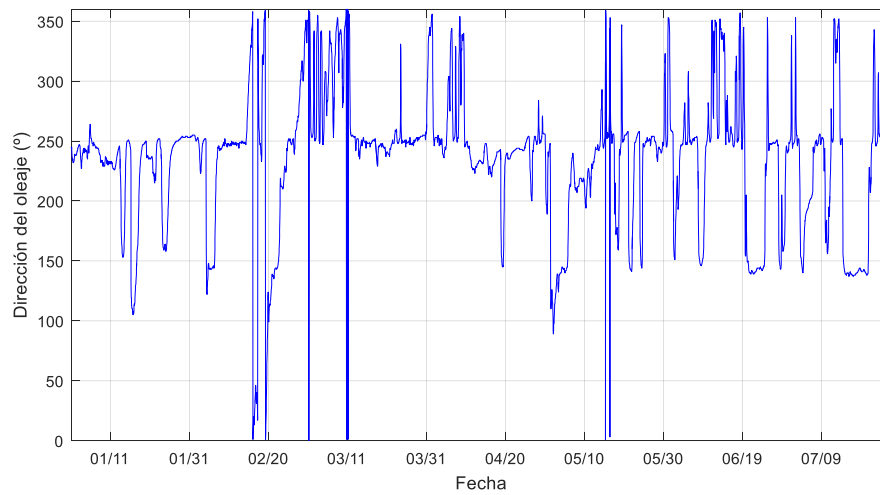


Figura 3.2-9. Altura de ola y dirección de procedencia del oleaje en Escenario de larga duración.

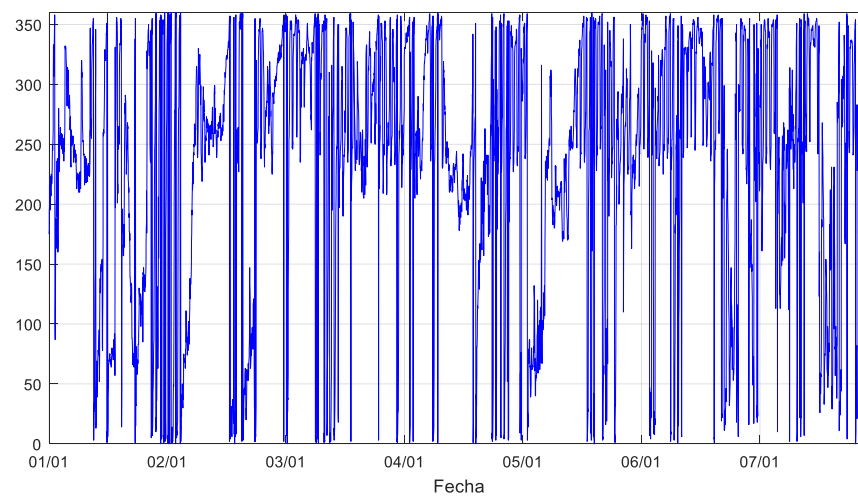
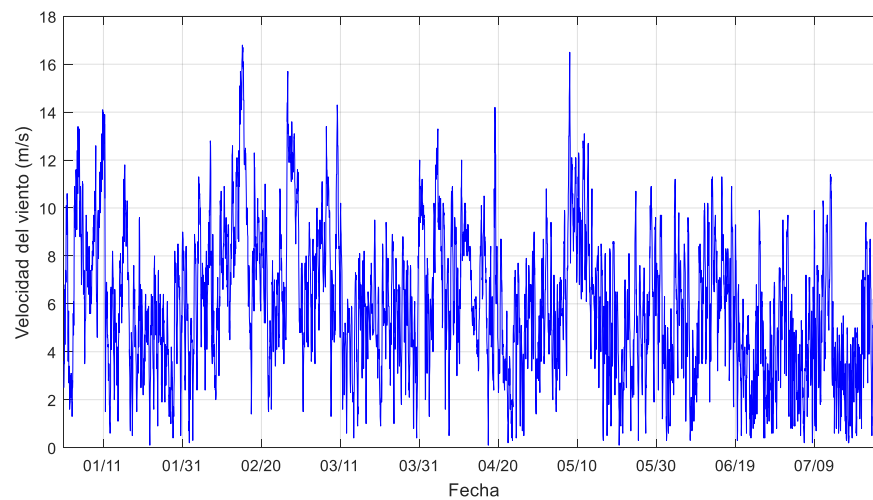


Figura 3.2-10. Velocidad y dirección de procedencia del viento en Escenario de larga duración

3.3 Implementación del modelo en la zona de estudio

Para llevar a cabo la implementación del modelo en la zona donde se realiza el estudio es necesario definir los datos y parámetros de entrada que requiere el modelo numérico Delft3D. Principalmente estos son:

- Grid
- Batimetría
- Archivo Wavecom
- Archivo de comunicación
- Parámetros del modelo
- Condiciones de contorno
- Puntos de control
- Spline
- Delimitación del Shoal

Por otro lado, también se hace mención a los problemas encontrados durante la implementación y el modelaje de la zona de estudio detallando las medidas adoptadas para su resolución.

3.3.1 Grid

El grid o malla es la discretización del dominio físico para la propagación el oleaje y modelo hidrodinámico. Los criterios para la definición de la misma han sido:

- Asegurar una buena precisión en la zona de la desembocadura, que es la zona en la que se centra el proyecto.
- Orientar la malla correctamente para que abarque todo tipo de oleaje.

En la Figura 3.3-1 se observan las dos mallas empleadas en el modelo. Su disposición es en forma de anidamiento, donde en la más amplia (grid w1) se produce la propagación del oleaje desde profundidades indefinidas y en la otra (grid f1) se realizan los cálculos relacionados con el transporte de sedimentos.

El tamaño de la malla w1 es de 244 x 244 celdas con unas dimensiones de 90 x 60 m (M x N) aproximadamente. Por otro lado, la malla f1 tiene un tamaño de 163 x 163 celdas con unas dimensiones aproximadas de 35 x 30 m (M x N).

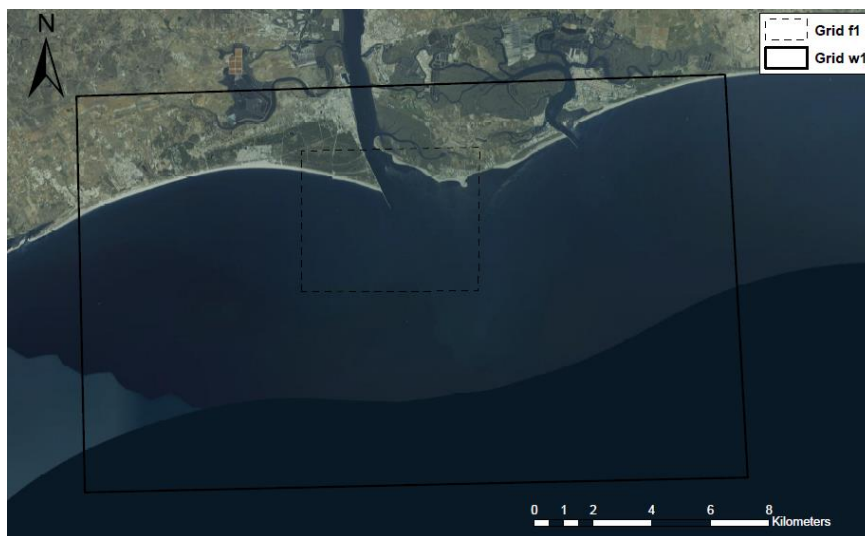


Figura 3.3-1. Definición de los contornos de los grid empleados.

3.3.2 Batimetría

La batimetría de la zona de estudio (Figura 3.3-2) ha sido proporcionada en formato archivo de texto con las coordenadas X, Y Z de cada punto, por el tutor del Proyecto, Alejandro López.

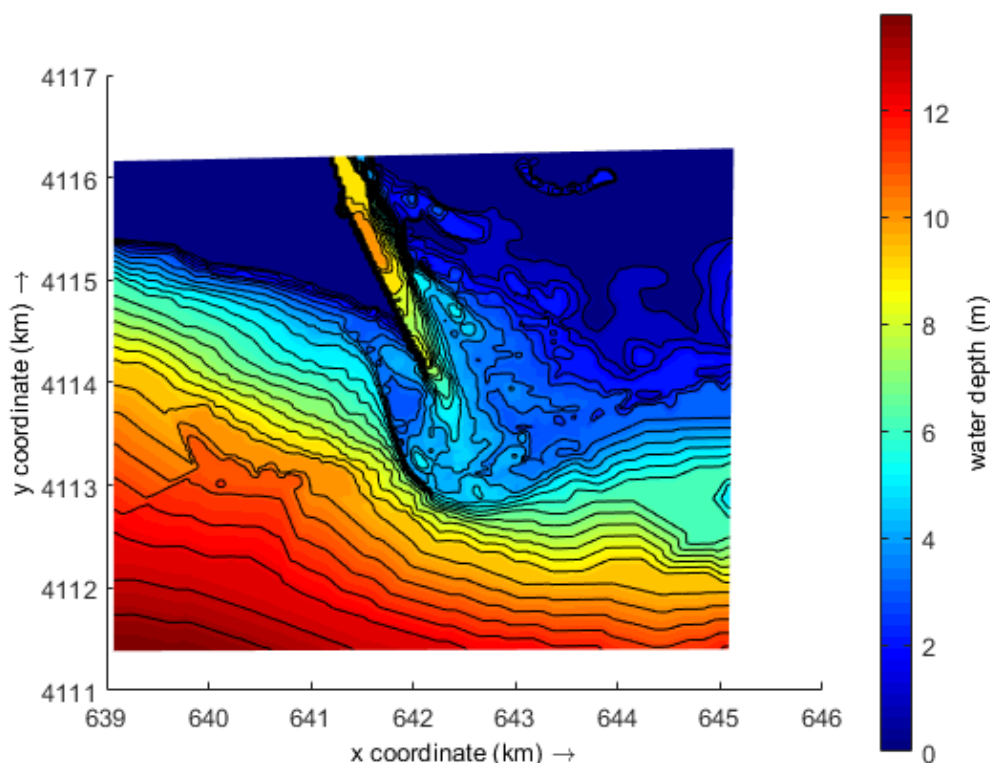


Figura 3.3-2. Representación gráfica de la batimetría inicial empleada en el modelo

3.3.3 Archivo WAVECON

Este archivo es el que contiene los datos del oleaje a propagar que usa el módulo WAVE. Consiste en un archivo de texto formado por ocho columnas: Tiempo, altura de ola significativa (H_s), periodo de pico (T_p), dirección de procedencia del oleaje (θ), dispersión (ms), nivel de superficie libre (η), velocidad del viento (V_v) y dirección de procedencia del viento (θ_v). Todos estos valores han sido obtenidos a partir de la información proporcionada por Puertos del Estado del punto “SIMAR 5026021”; con el cual se define un valor por cada hora durante el periodo de simulación.

3.3.4 Archivo de comunicación

El archivo de comunicación (“com file”) es el archivo de salida del módulo Delft3D-WAVE donde escribe los resultados de las diferentes variables procedentes de la propagación del oleaje en la malla establecida en el modelo. La existencia de este archivo surge cuando se encuentran los módulos WAVE y FLOW trabajando de forma conjunta, proporcionándole el primero dichos resultados al segundo como base para proceder con el cálculo hidrodinámico y de transporte de sedimentos durante el tiempo y el grid implementados en el modelo.

3.3.5 Condiciones de contorno

En la desembocadura del río Guadiana predomina el forzamiento mareal. Por ello, en el contorno “Sur” (2,1; 164,1) se han impuesto condiciones abierta del tipo nivel con forzamiento astronómico incluyendo los nueve armónicos de marea más significativos representados en la Tabla 2.4-5.

Los contornos laterales, “Este” (164,137; 164,2) y “Oeste” (1,144; 1,2), han sido modelados como condición abierta tipo Neumann donde se ha impuesto un forzamiento mediante un “time-series”, donde sus valores son nulos en todo el contorno y durante todo el tiempo de simulación.

Por otro lado, y para finalizar, se ha impuesto en la desembocadura del río, “Caudal Rio” (58,164; 62,164), un contorno tipo “Total discharge”, donde se modela la descarga de caudal del río en su desembocadura con un caudal constante durante toda la simulación de 1000 m³/s en el caso de los temporales y de 300 m³/s en el caso del “Estado de Calma”.

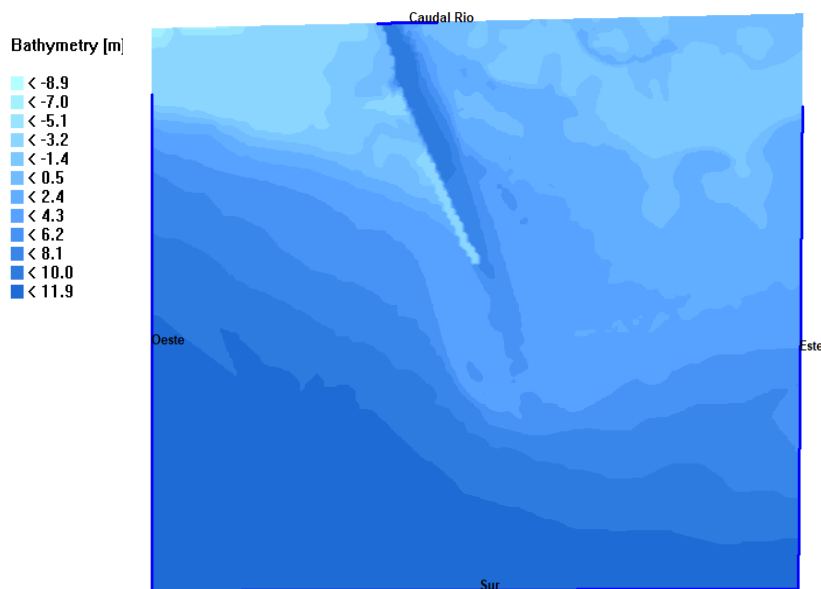


Figura 3.3-3. Contornos del modelo

3.3.6 Puntos de control

Para el análisis de los resultados obtenido con la simulación del modelo generado, se han creado tres Puntos de Control con el fin de exportar diferentes variables en función del tiempo (Figura 3.3-4). La localización de los mismos se ha seleccionado de forma estratégica, considerando de gran importancia el conocimiento de dichas variables como pueden ser, la velocidad de corriente o la descarga para el estudio de la influencia del oleaje o de la existencia de la descarga del río en el modelo.

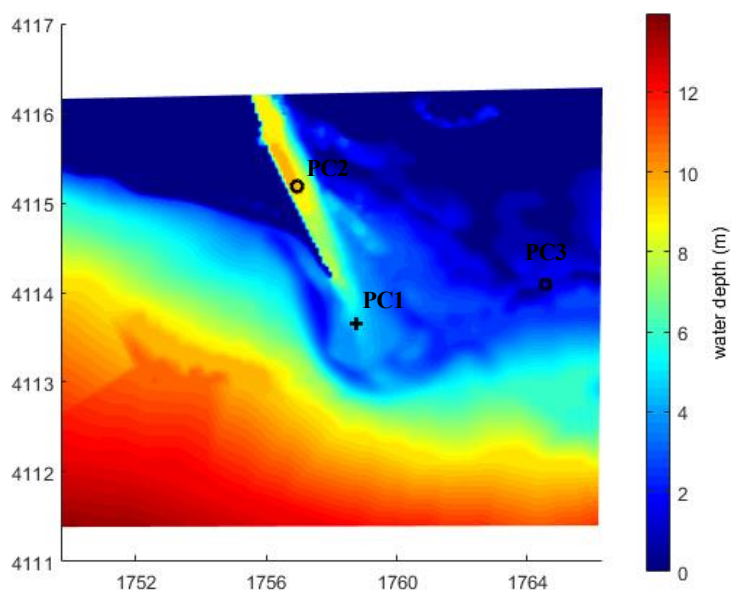


Figura 3.3-4. Representación de ubicación de los Puntos de Control en el dominio de estudio.

3.3.7 Spline

Para el modelaje y estudio del canal de navegación del estuario de la desembocadura del río Guadiana se ha generado un spline (Figura 3.3-5) recorriendo parte del mismo. Este elemento del modelo posibilitará la interpolación de los resultados en el mismo para su posterior análisis.

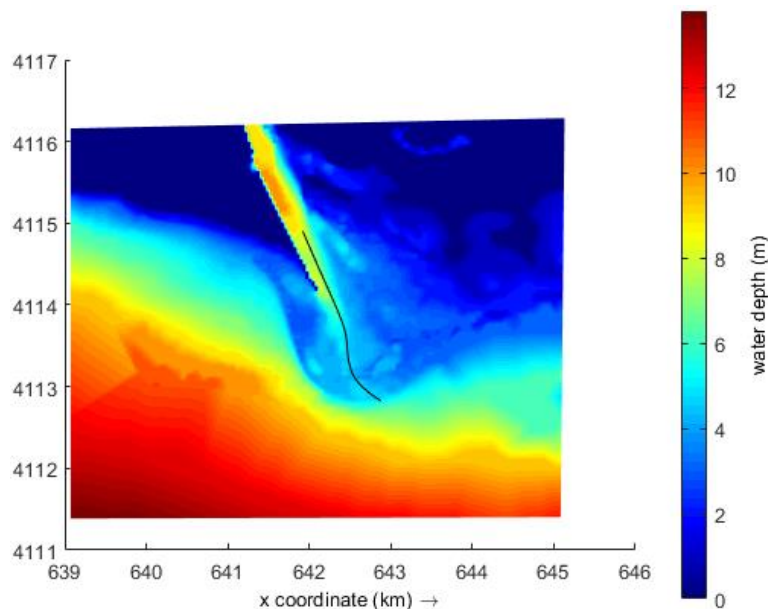


Figura 3.3-5. Canal de navegación modelado como Spline en la batimetría inicial.

3.3.8 Delimitación de las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”

Otro aspecto que se ha considerado relevante para el alcance de algunos de los objetivos propuestos en este proyecto es la definición de tres zonas delimitadas en las cuales, se realizará un análisis de las variables estudiadas. El conocimiento del comportamiento de la hidrodinámica y el estudio de las variables más relevantes de dichas zonas posibilitará el llevar a cabo un análisis más profundo que dará pie a llegar a exponer explicaciones y conclusiones de comportamientos que no se eran capaces de determinar únicamente con el conocimiento de los resultados obtenidos en el dominio de estudio de forma global. Del mismo modo que el canal de navegación y los Puntos de Control, dichas zonas han sido delimitadas con el fin de aprovechar al máximo los resultados exportados (Figura 3.3-6).

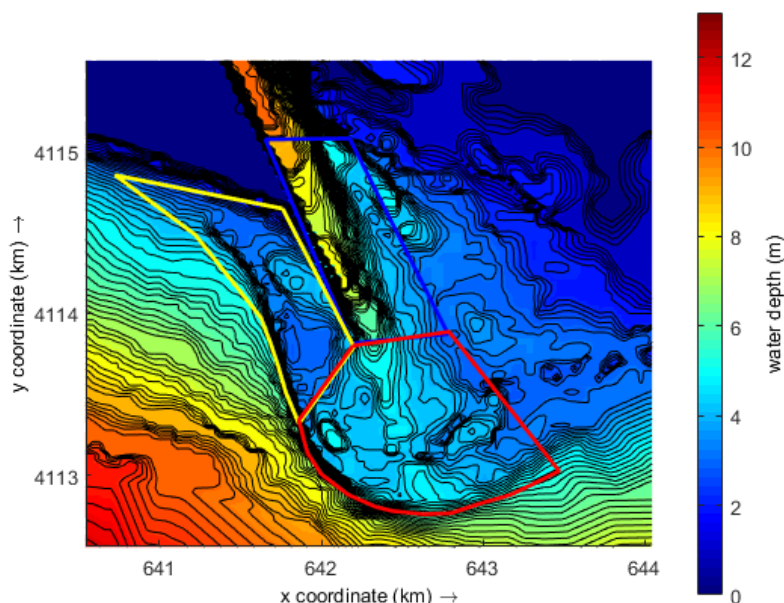


Figura 3.3-6. Representación de la delimitación del “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en el dominio de estudio.

3.3.9 Problemas y medidas adoptadas

Durante el periodo de tiempo aprovechado para la implementación y generación del modelo en la zona de estudio, se han dado una serie de problemas que han llevado a la adopción de medidas para solucionarlos y poder seguir con el proceso de generación de un modelo que se adapte lo máximo posible a la realidad. Estos problemas, en la mayoría de los casos imposibilitaban la continuidad de la simulación debido a la existencia de irregularidades en la misma, normalmente en forma de valores excesivos y puntuales de la “Depth Averaged velocity” que provocaban cambios bruscos en la morfología del fondo en forma de sedimentación o erosión incoherentes.

Las primeras medidas adoptadas para la resolución de las dificultades han sido dos; la primera fue la disminución de la rugosidad de Chezy a un valor de 15 en las celdas ubicadas en los dos contornos abiertos laterales, “Este” y “Oeste”, frente al valor de 65 constante, inicialmente establecido en todo el grid ya que resultaban valores excesivos de la “Depth Averaged velocity” procedentes de los mismos.

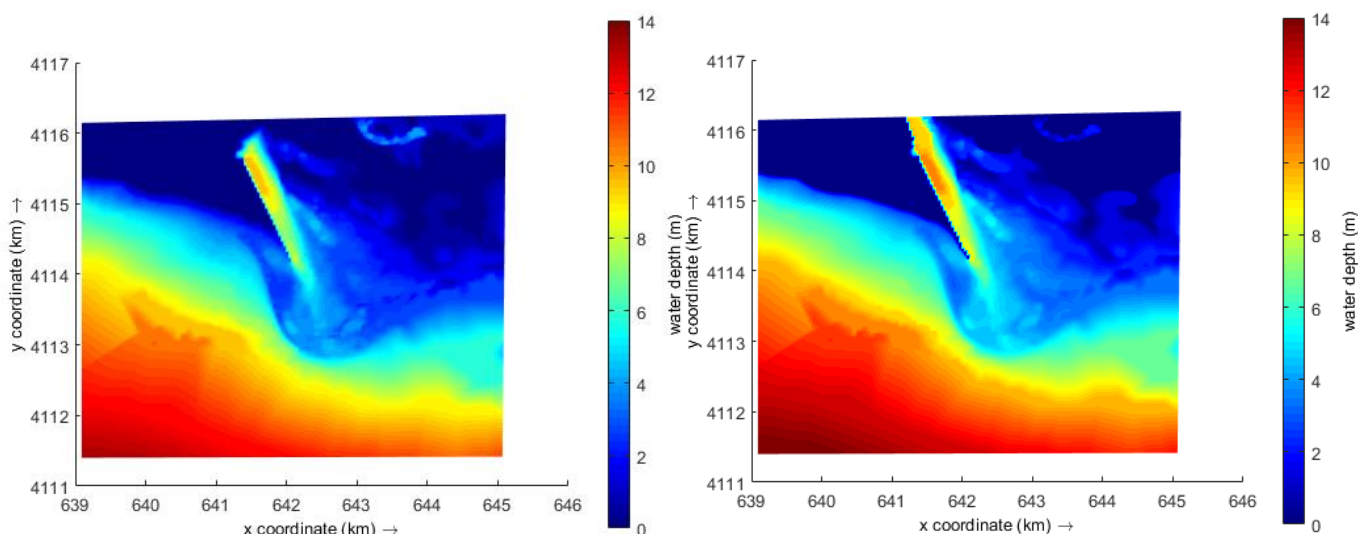


Figura 3.3-7. Batimetría original y batimetría modificada en la zona de descarga del río Guadiana además del aumento de cota de la rasante del Dique de Poniente

Por otro lado, se llevó a cabo una modificación de la batimetría en la zona más cercana a la descarga del río, como se puede observar en la Figura 3.3-7, donde se prolongó la batimetría existente adyacente al Dique de Poniente hasta el contorno superior del grid, ya que resultaban erosiones y sedimentaciones no adaptadas a la realidad debido a los valores elevados de la variable mencionada anteriormente.

Otra problemática solventada fue el rebase cuasi-permanente del Dique de Poniente debido al oleaje incluido en la simulación; ya que la interpolación de la batimetría realizada previamente en las celdas del grid no daba buen resultado al ser un elemento puntual con dimensiones esbeltas. Por lo tanto, se procedió a la modificación de la batimetría dándole más altura de rasante al dique, como se puede observar en la Figura 3.3-7. Tras su comprobación, dio como resultado la eliminación de las erosiones y sedimentaciones con valores excesivos en la zona adyacente al mismo debido a los valores de la “Depth Averaged velocity” y al rebase del mismo.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

Atendiendo a los objetivos de este trabajo, se considera que los resultados hidrodinámicos más relevantes que deben analizarse, compararse y describirse son:

- Variaciones del nivel del mar, profundidad y velocidades de corriente tanto en el dominio de estudio como en el canal de navegación en los instantes de marea máxima o mínima, llenante y vaciante de cada uno de los escenarios de simulación.
- Influencia de la existencia de la descarga del río en el dominio de estudio tanto en caudal como en el aporte de sólidos que la define, a través del análisis de magnitudes como son el transporte de sedimentos, cambios en la batimetría y oleaje. Dicho análisis será realizado desde tres puntos de vista:
 - Influencia en la vía de navegación definida por medio del análisis de las magnitudes “Averaged velocity” y “Total discharge” en los Puntos de Control 1 y 2 que son los encontrados en el recorrido longitudinal de la misma. Además, se realizará una comparación de los resultados de batimetría interpolados en dicho canal de la batimetría inicial y la batimetría final en cada uno de los escenarios de simulación seleccionados para el estudio del comportamiento del modelo, lo que posibilitará realizar el análisis de la sedimentación o erosión acumulada a lo largo del mismo.
 - En el dominio de estudio, a través del estudio del alcance del sedimento en dicho dominio descargado por el río Guadiana y el análisis de las diferencias de los volúmenes de sedimentación y erosión acumulada en los casos de ausencia de descarga, de descarga sin aporte de sólidos y con la existencia de descarga con aporte de sólidos en cada uno de los escenarios de simulación.
 - En las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”, definidas en el apartado 3.3.8, a través de un estudio más preciso que sigue el mismo proceso que el apartado anterior. El análisis del volumen aislado de sedimentación y erosión acumulada en cada una de las tres zonas mencionadas en función de la ausencia de descarga, de la existencia de descarga sin aporte de sólidos y con la existencia de descarga con aporte de sólidos en cada uno de los escenarios de simulación. Además, se lleva a cabo el estudio de la diferencia de los volúmenes en función de las tres casuísticas en los que se ha calculado, para poder llegar a concluir con la definición de los transportes de sedimentos locales más importantes.
- Influencia de la acción del oleaje en el dominio de estudio. Análisis de los diferentes escenarios seleccionados por dirección predominante del oleaje desde los tres puntos de vista mencionados en el punto anterior:

- En la vía de navegación mediante el análisis y comparación de las batimetrías finales de cada uno de los temporales en función de la dirección predominante del oleaje. Además, se lleva a cabo un estudio de la sedimentación y erosión acumulada a lo largo del recorrido longitudinal de dicho canal.
 - En el dominio de estudio a través de la representación de los cambios de batimetría en cada uno de los temporales o escenarios mencionados, junto con el cálculo del volumen de sedimentos depositados y erosionados.
 - En las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” mediante el mismo análisis que se ha realizado en el estudio de la influencia de la descarga del río teniendo en cuenta la existencia de la descarga con el aporte de sólido en función de los temporales.
- El estudio de los resultados obtenidos del escenario de “Larga de Duración” propuesto, a través del análisis de las mismas magnitudes desarrolladas en los demás apartados de este capítulo.

4.2 Hidrodinámica en la zona de estudio

A partir del modelo realizado en Delft-3D se han obtenido los valores de elevaciones del nivel del agua, profundidades, velocidades horizontales y máximos esfuerzos cortantes en toda la zona de estudio. A continuación, se representan figuras de estas variables en los instantes de tiempo más característicos para cada una de ellas y su variación de lo largo del canal de navegación.

4.2.1 Elevación del nivel del agua

En las Figura 4.2-1, Figura 4.2-2, Figura 4.2-3 y Figura 4.2-4 se han representado el nivel del mar en la zona de estudio y a lo largo del canal de navegación en cuatro instantes de tiempo y en cada uno de los temporales simulados en el modelo. El análisis de estas figuras es decisivo para conocer el nivel del mar y sobre todo la zona inundada por el agua en cada en los momentos seleccionados. Estos momentos mencionados, han sido elegidos tales que sean característicos, es decir, máximos o mínimos de cada simulación. Por consiguiente, se han optado por los estados de pleamar y bajamar mínimas y máximas de cada uno de los temporales (Tabla 4.2-1).

Instante	Marea	T1 WSW	T2 SW	T3 SE	Estado de Calma
Bajamar	Mínima	10/04/2008, 15:00	03/01/2017, 2:00	15/01/2016, 4:00	31/01/2017, 1:00
Pleamar	Mínima	10/04/2008, 19:00	03/01/2017, 8:00	15/01/2016, 10:00	31/01/2017, 7:00
Bajamar	Máxima	07/04/2008, 12:00	05/01/2017, 18:00	17/01/2016, 19:00	28/01/2017, 11:00
Pleamar	Máxima	07/04/2008, 18:00	06/01/2017, 00:00	18/01/2016, 01:00	28/01/2017, 15:00

Tabla 4.2-1. Instantes seleccionados de bajamar y pleamar máxima y mínima en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración.

En cada una de las figuras mencionadas anteriormente se han representado los instantes en los cuales se considera más relevante estudiar cada situación de marea y se ha establecido la misma variación de colores en cada uno de los instantes.

Analizando y comparando los resultados de pleamar y bajamar, se deduce que la carrera de marea en el caso de las mareas mínimas es únicamente de 1 m, mientras que en el caso de las mareas máximas es de 3 aproximadamente. Además, del mismo modo, se observa que las mareas tienen influencia en toda la zona modelada, inundando una amplia zona de marismas en la zona de Isla Canela.

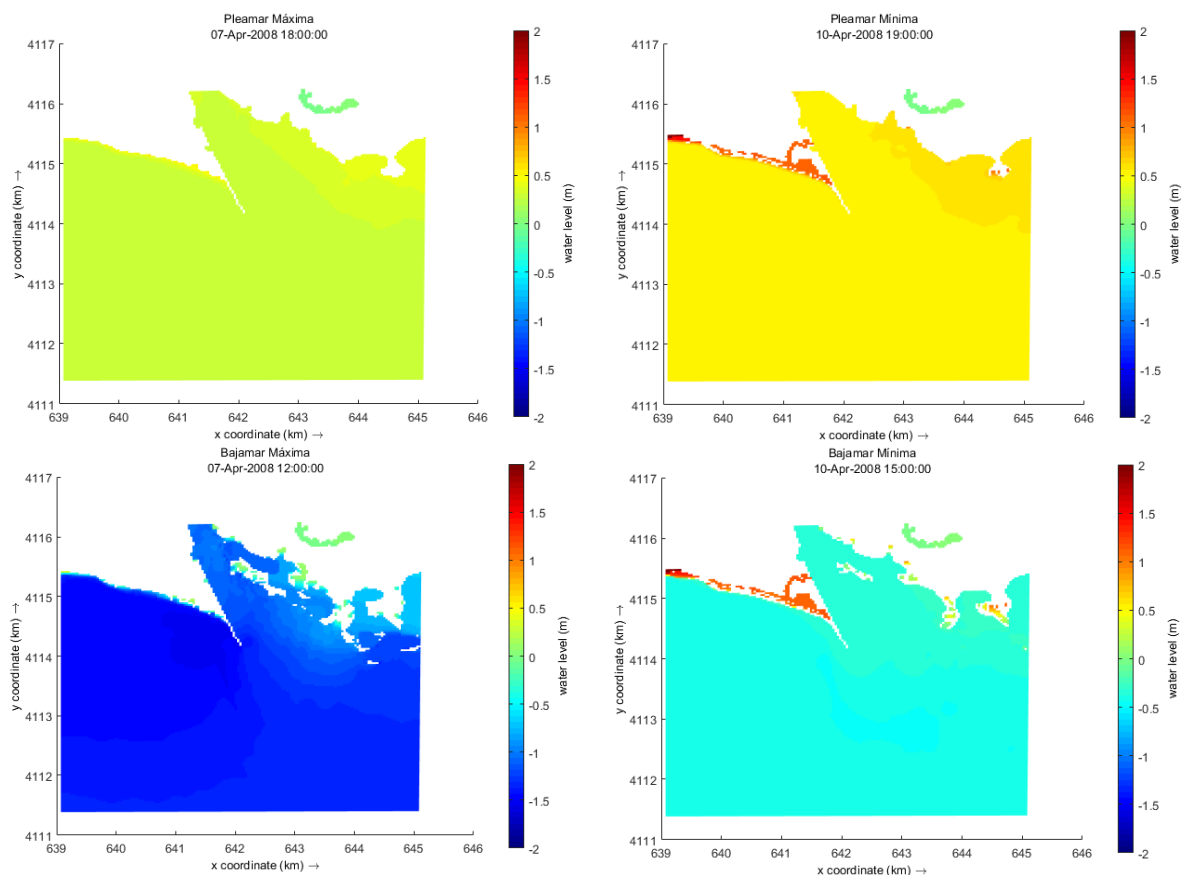


Figura 4.2-1. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T1 WSW en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-2

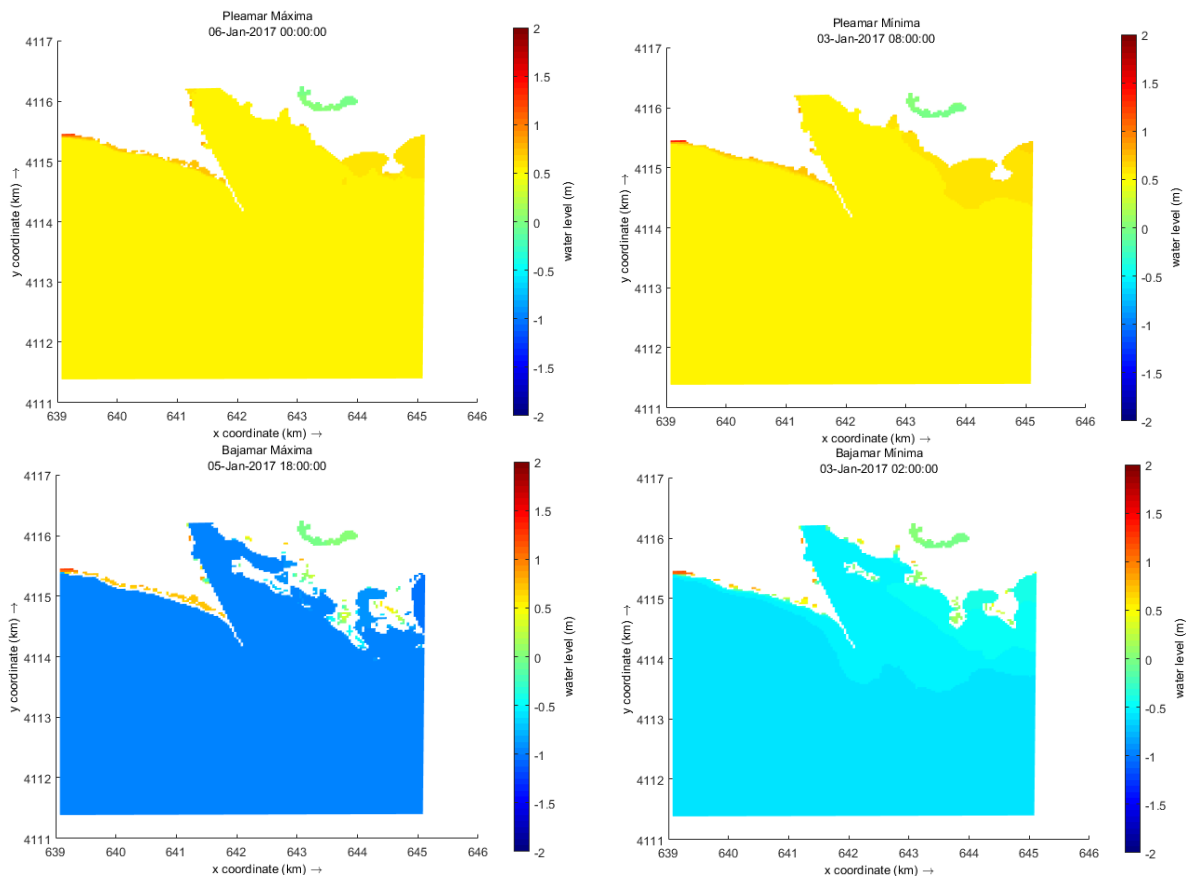


Figura 4.2-2. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T2 SW en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-3

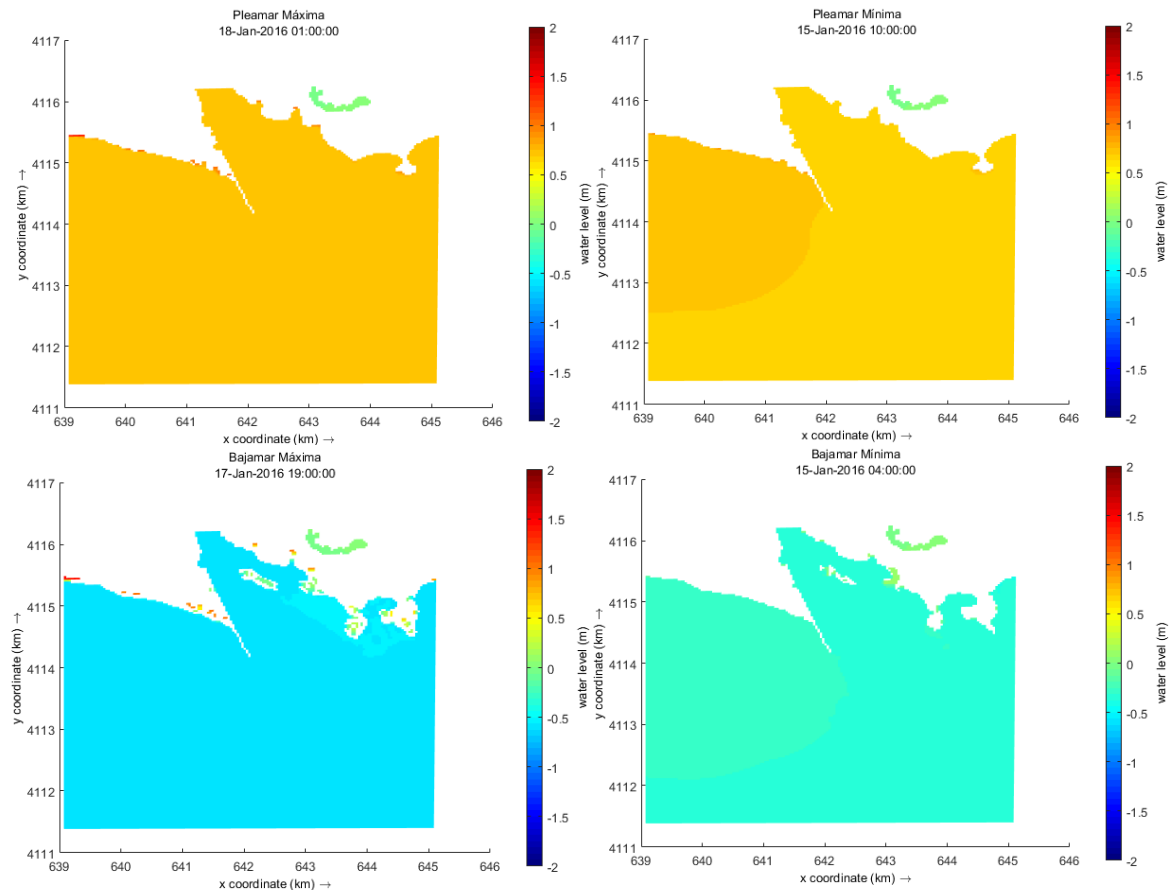


Figura 4.2-3. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio T3 SE en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-4

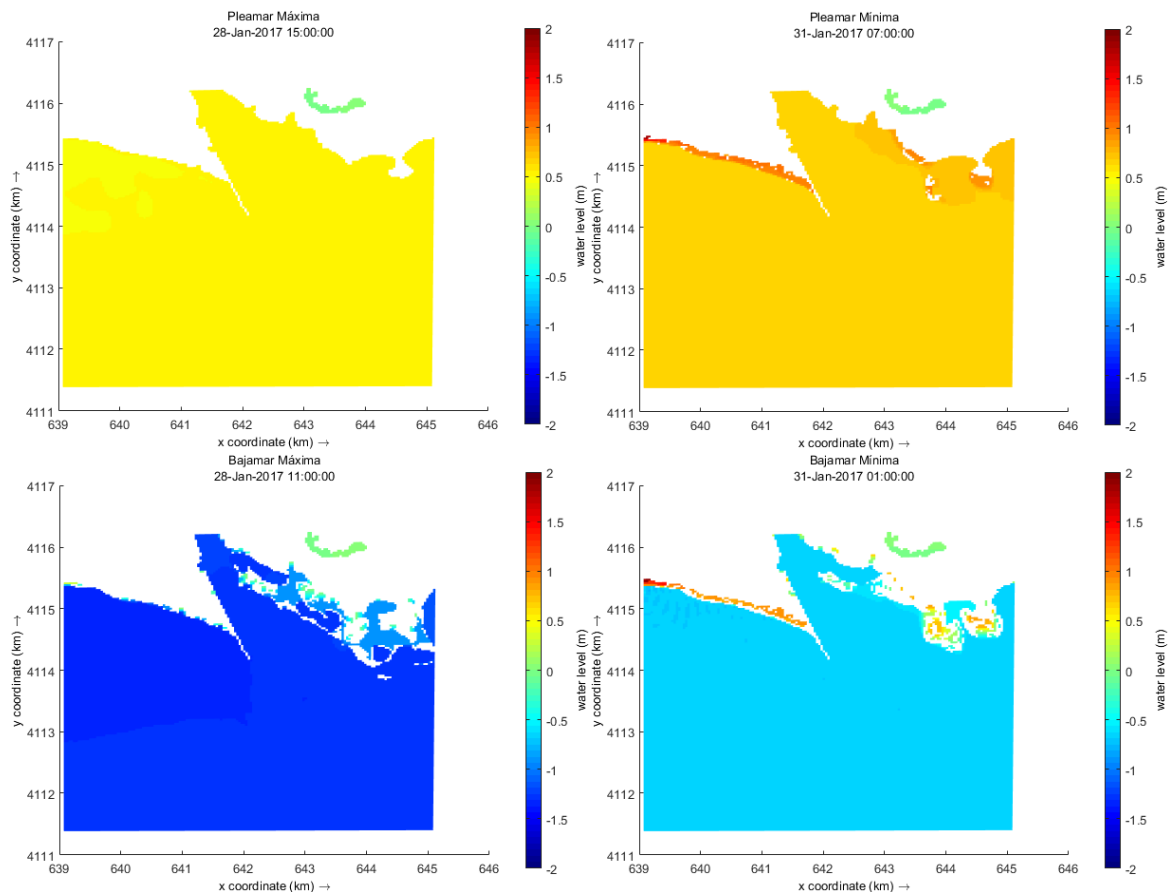


Figura 4.2-4. Elevación del nivel del mar en la zona de estudio Estado de Calma en los instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la

Tabla 4.2-5

Como se puede observar en las figuras anteriores, los momentos más restrictivos en el estudio del calado y elevación del nivel del mar son los de bajamar. A continuación, se pueden observar dichos resultados interpolados en el canal de navegación en cada uno de los instantes mencionados en la (Tabla 4.2-1).

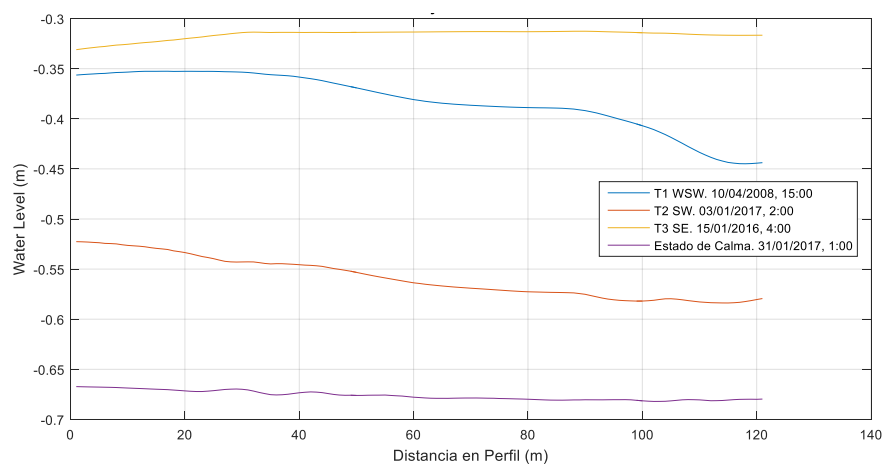


Figura 4.2-5. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Bajamar Mínima definido en la Tabla 4.2-6 en los escenarios de simulación de corta duración

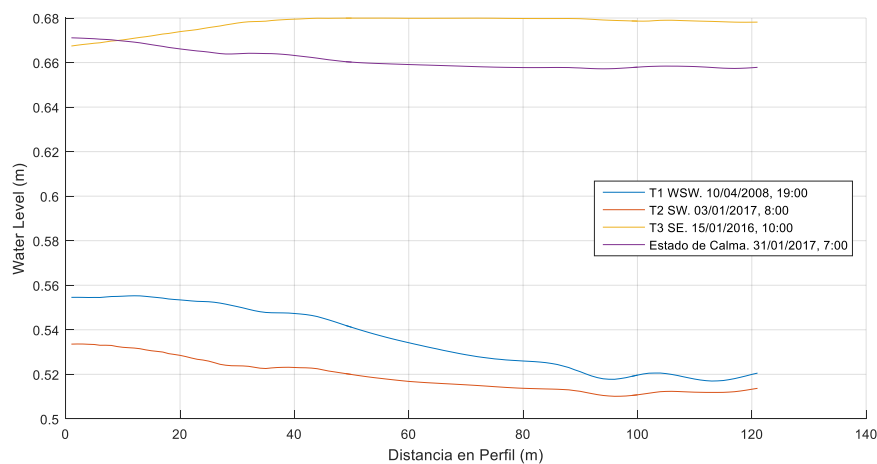


Figura 4.2-6. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Pleamar Mínima definido en la Tabla 4.2-7 en los escenarios de simulación de corta duración

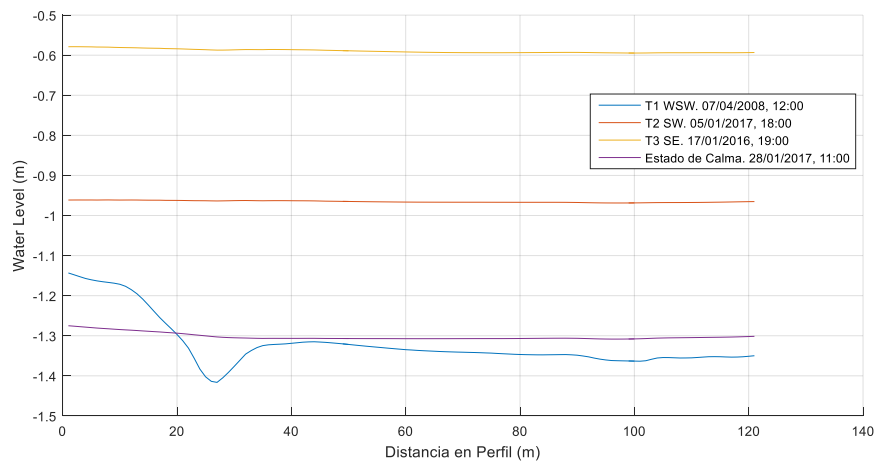


Figura 4.2-7. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Bajamar Máxima definido en la Tabla 4.2-8 en los escenarios de simulación de corta duración

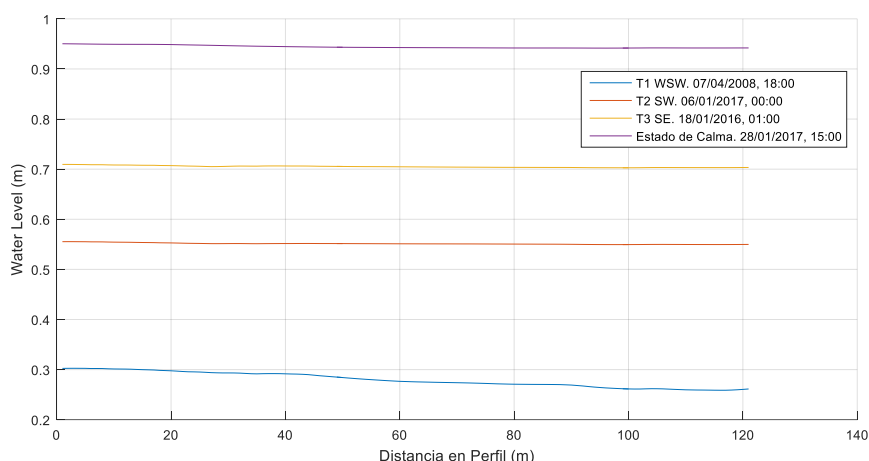


Figura 4.2-8. Elevación del nivel del mar en canal de navegación en el instante de Pleamar Máxima definido en la Tabla 4.2-9 en los escenarios de simulación de corta duración

4.2.2 Profundidad

Para analizar las posibles condiciones de navegabilidad es recomendable que su examen se lleve a cabo a partir de la variable “profundidad”, ya que es el nivel del agua que se encuentra referenciado al cero hidrográfico y se tendría que comparar con la profundidad del lecho. Precisamente, una de las variables que proporciona como resultado el software Delft-3D, se corresponde con la variable mencionada e idónea para la determinación de dicha profundidad del lecho, pues esta variable representa la columna de agua sobre el fondo. En este caso, el estudio y representación de los mismos instantes de tiempos definidos para la elevación, es lo más recomendable (Tabla 4.2-1).

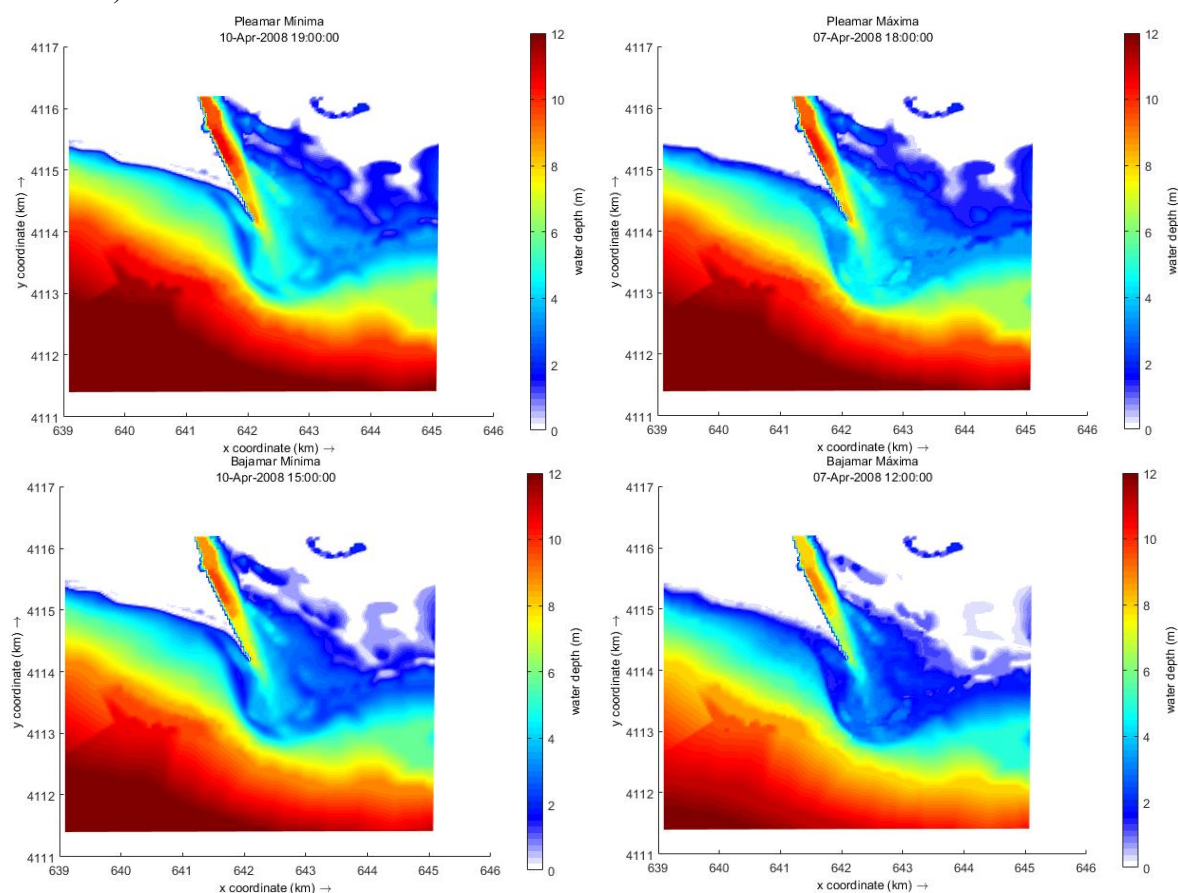


Figura 4.2-9. Profundidad en la zona de estudio en el escenario T1 WSW en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1

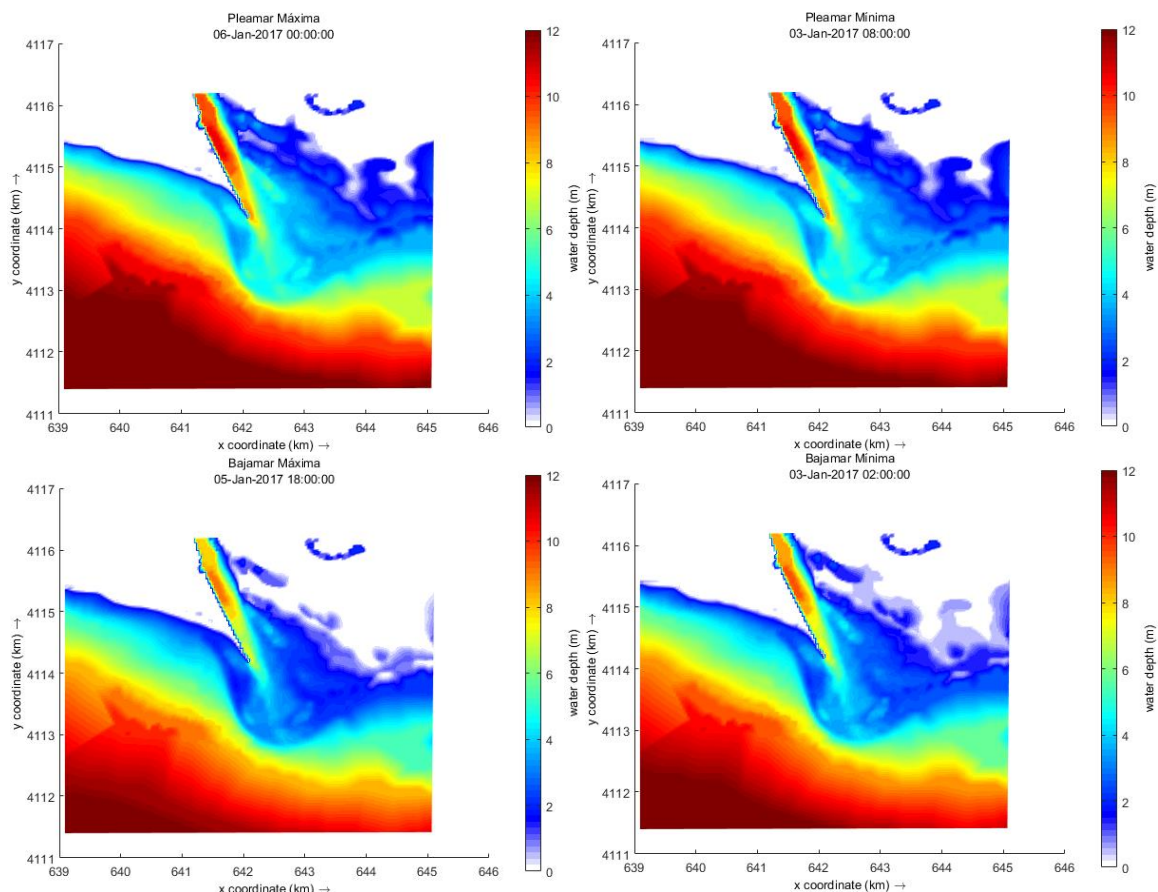


Figura 4.2-10. Profundidad en la zona de estudio en el escenario T2 SW en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1

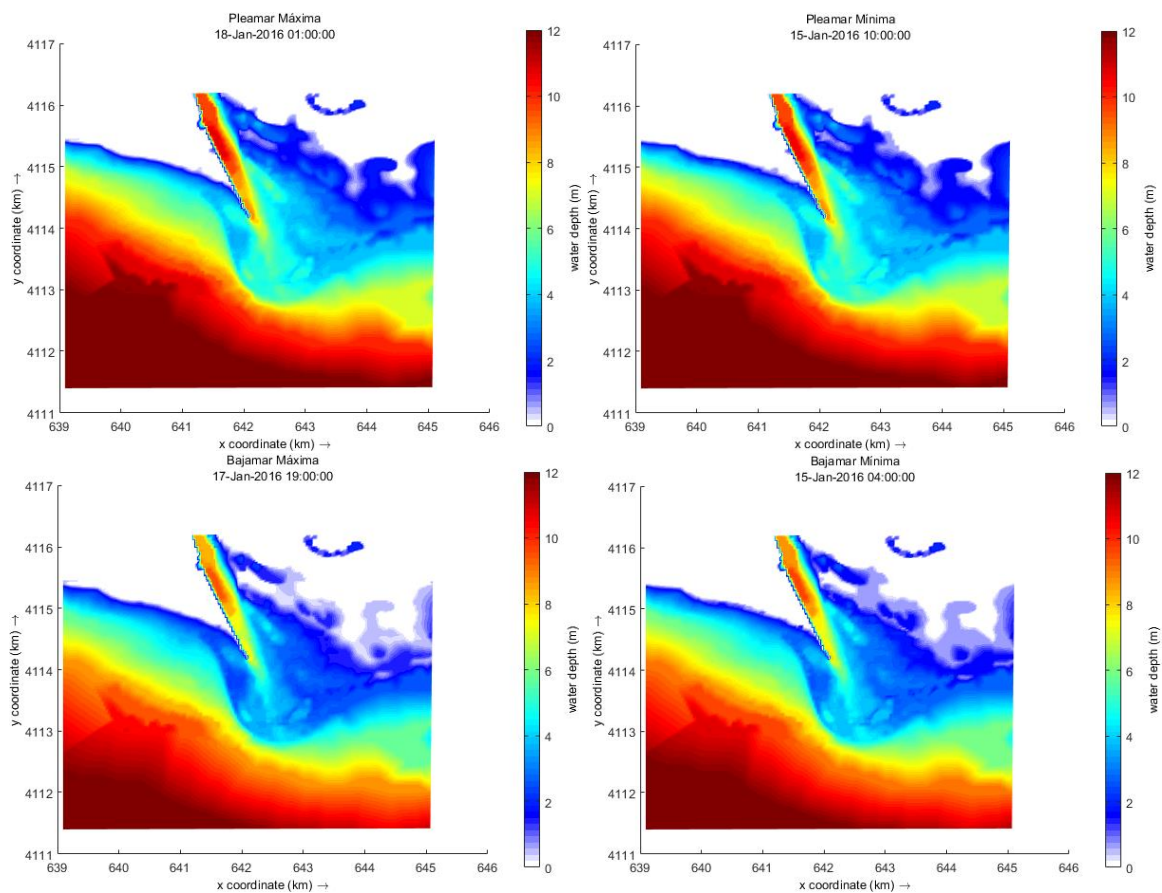


Figura 4.2-11. Profundidad en la zona de estudio en el escenario T3 SE en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1

Los valores representados de profundidad serán objeto de análisis en apartados posteriores de este trabajo. Hay que tener en cuenta que, debido al gran comportamiento dinámico en cuanto a transporte de sedimentos y variación en la batimetría de la zona de estudio, el periodo de tiempo comprendido antes de los instantes representados influirá mucho en los valores de profundidad.

Por otro lado, se puede observar del mismo modo que en el apartado anterior, que los instantes donde se pueden encontrar valores de menor profundidad coinciden con los de bajamar máxima, en los cuales se hace notar la formación del “shoal” estudiado en apartados posteriores.

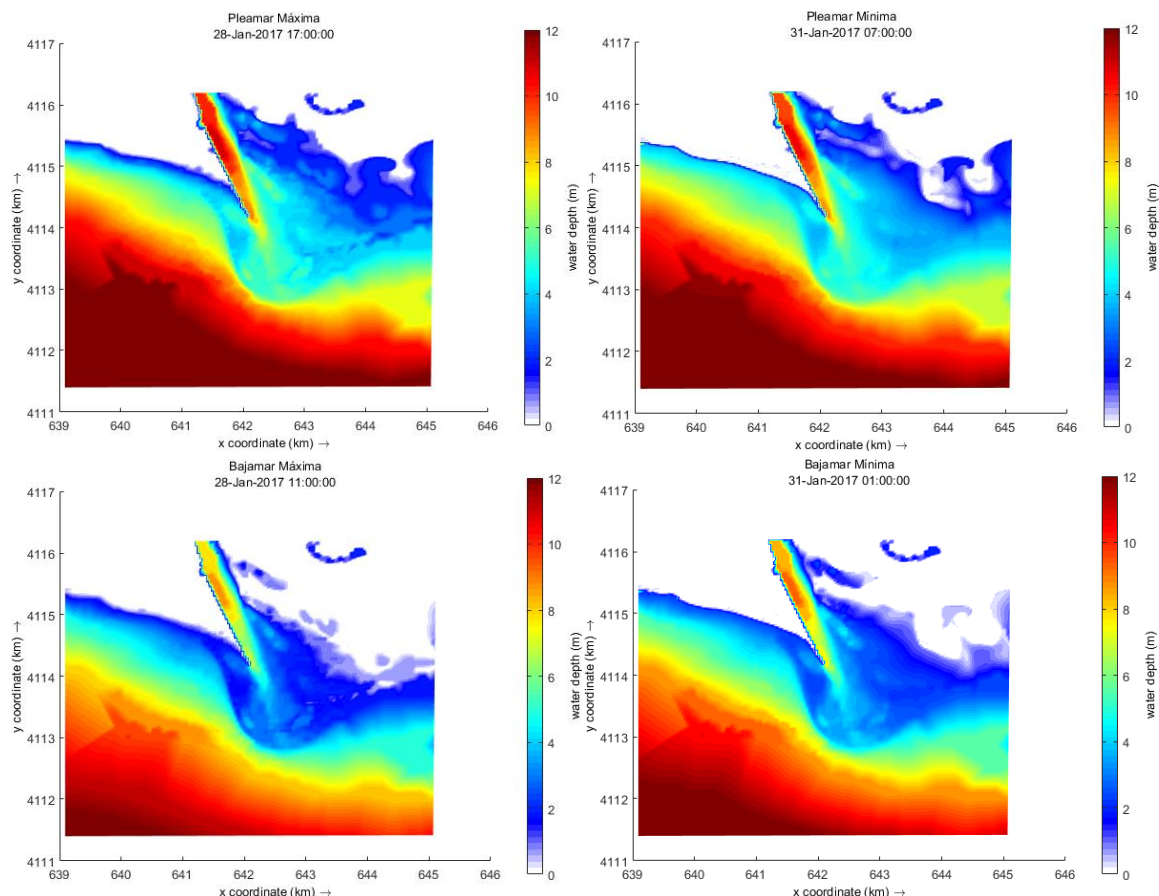
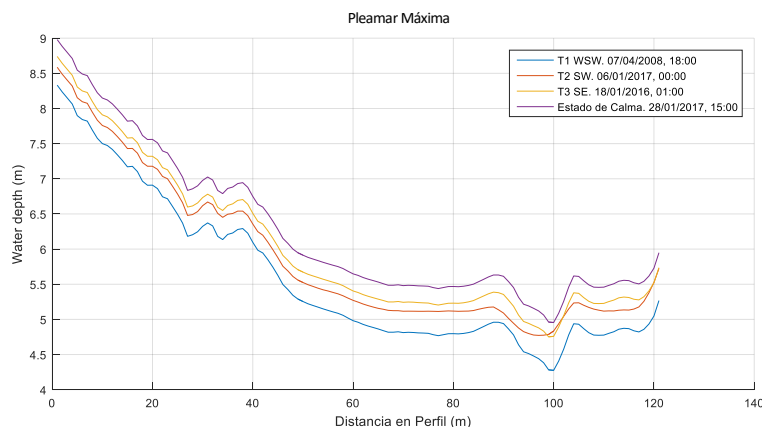


Figura 4.2-12. Profundidad en la zona de estudio Estado de Calma en instantes de bajamar y pleamar máximas definidos en la Tabla 4.2-1

A continuación, se representa en la Figura 4.2-13 los valores de profundidad interpolados en el canal de navegación para la realización del análisis de la variable mencionada en cuanto a condiciones de navegabilidad, correspondiéndose su comienzo con el extremo ubicado en la bocana de la desembocadura, por lo tanto, su recorrido longitudinal se lleva a cabo hacia aguas profundas.



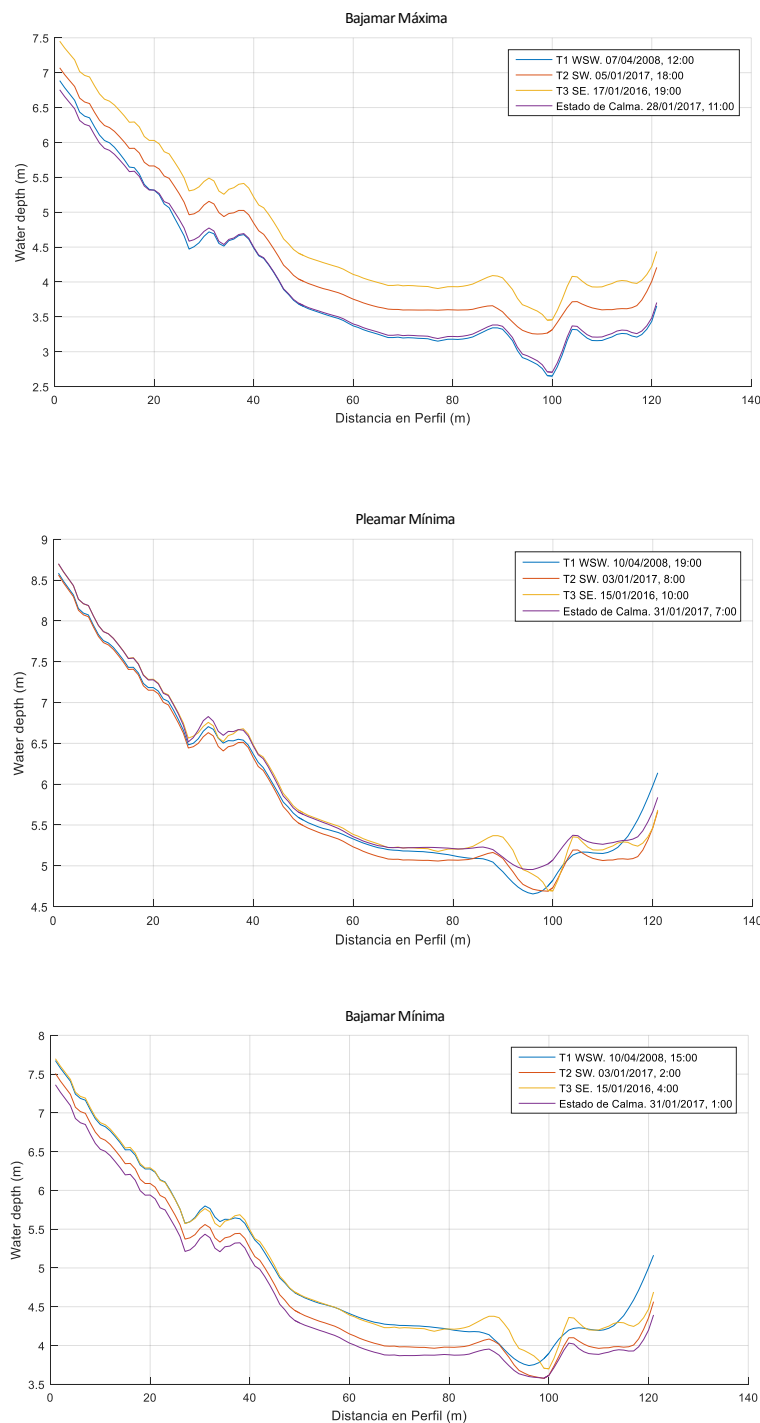


Figura 4.2-13. Profundidad en canal de navegación en instantes de bajamar y pleamar máxima y mínima definidos en la Tabla 4.2-1 en escenarios de simulación de corta duración.

Se que en los instantes de pleamar tanto máxima como mínima, no se encontrarían problema en cuanto al cumplimiento de condiciones de navegabilidad en el canal. En cambio, en los instantes de bajamar, sobre todo en las máximas, en los que la profundidad supera levemente el valor de 2.5 m. Como conclusión, cabe mencionar que, en estado de bajamar y marea máxima, la profundidad puede llegar a ser insuficiente para su navegación siendo de gran importancia una obra de dragado para posibilitar su navegabilidad.

4.2.3 Velocidad de corriente

Otro factor influyente en las condiciones de navegabilidad o por lo menos, de gran relevancia en cuanto a su análisis es la velocidad de corriente. En las Figura 4.2-14, Figura 4.2-15, Figura 4.2-16 y Figura 4.2-17 se representa la intensidad y dirección de la velocidad de la corriente en los dos instantes que se han considerado más interesantes de cada uno de los escenarios analizados en este proyecto. Estos instantes de escenificación son los seleccionados con la intención de recopilar las velocidades máximas y mínimas, las cuales aparecen en las mareas máximas (Tabla 4.2-10)

Instante	T1 WSW	T2 SW	T3 SE	Estado de Calma
Llenante	07/04/2008, 15:00	05/01/2017, 21:00	17/01/2016, 22:00	28/01/2017, 14:00
Vaciante	07/04/2008, 21:00	05/01/2017, 15:00	17/01/2016, 16:00	28/01/2017, 20:00

Tabla 4.2-10. Instantes de representación de velocidad de corriente

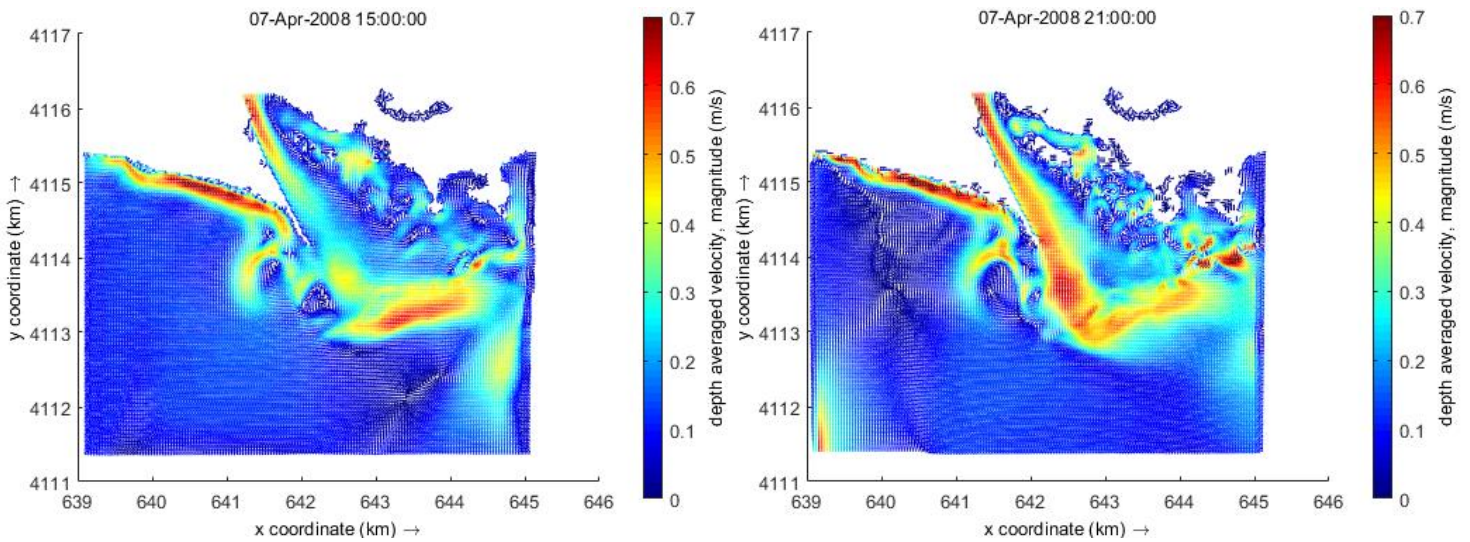


Figura 4.2-14. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante, definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio T1 WSW

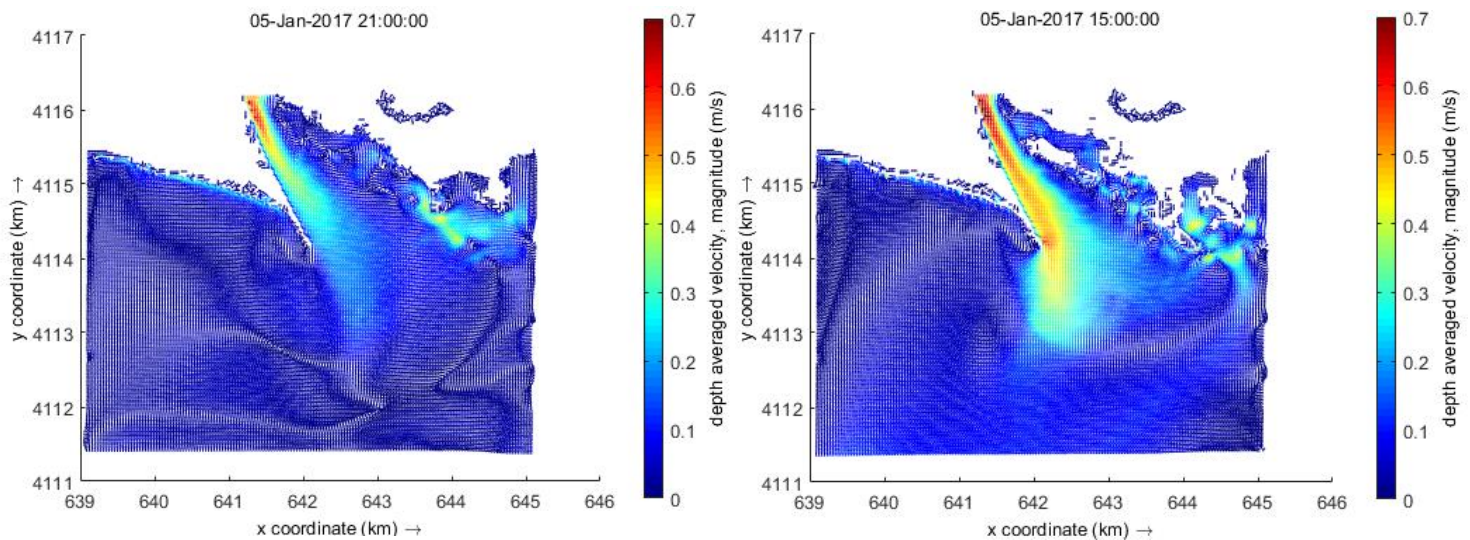


Figura 4.2-15. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante, definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio T2 SW

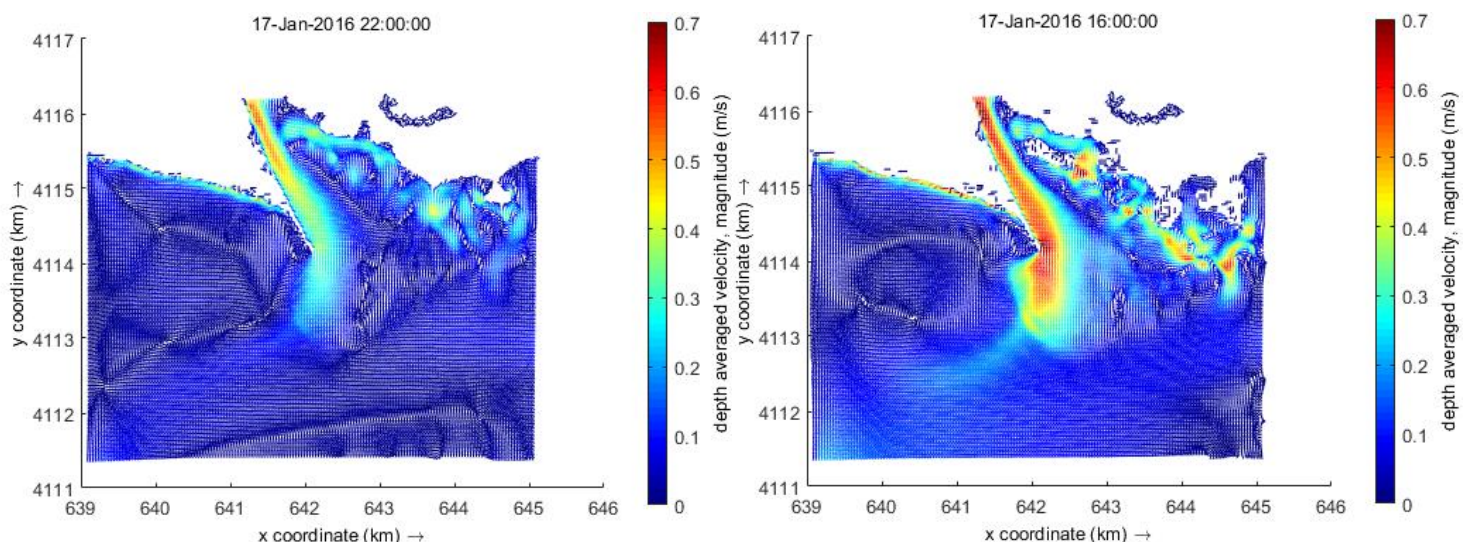


Figura 4.2-16. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio. T3 SE

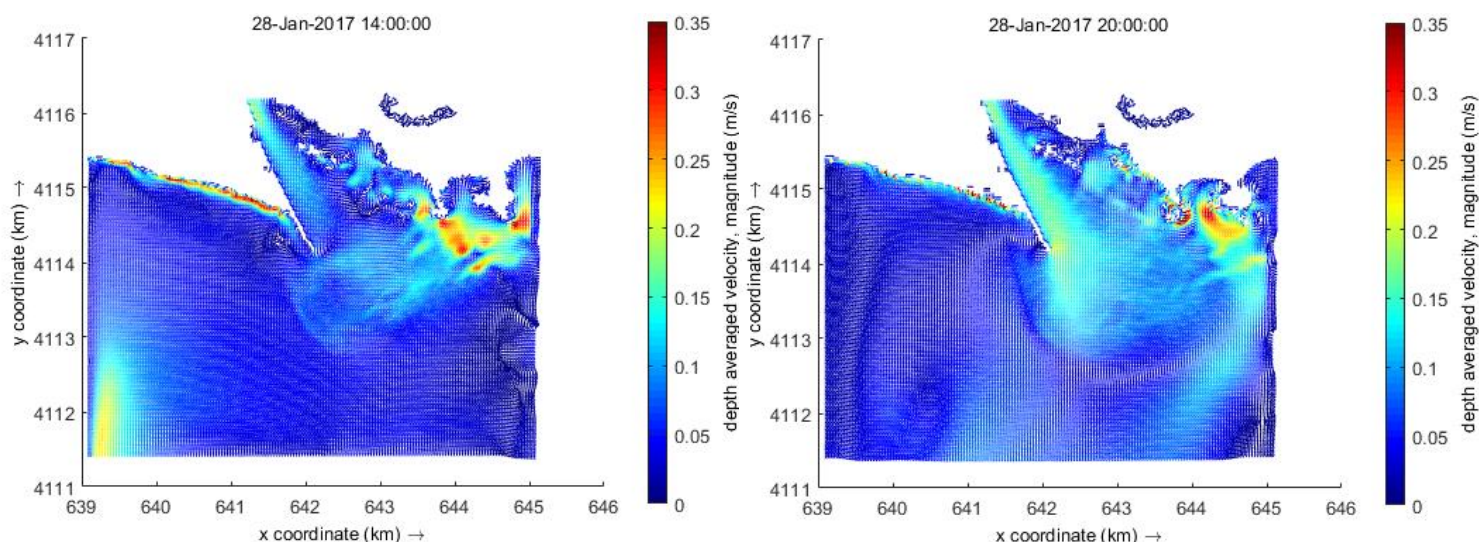


Figura 4.2-17. Velocidad de corriente en los instantes de llenante y vaciante, definidos en la Tabla 4.2-10, respectivamente en la zona de estudio. Estado de Calma

Las velocidades de corriente, como se puede observar en las figuras anteriores, son mayores en los instantes de vaciante debido a la participación más activa de la descarga del río en su desembocadura, la cual se destaca claramente en dicho instante. Por lo general, la oscilación de los valores máximos en dichos instantes es de alcance desde 0.5 m/s en los instantes de llenante hasta alcanzar valores de casi 2 m/s en los instantes de vaciante.

Por otro lado, en la Figura 4.2-14, la cual corresponde al “T1” con dirección predominante del oleaje de WSW, es en la que se hace notorio velocidades de corriente elevadas en gran parte del dominio de estudio. Se observan valores elevados de dicha magnitud en ambos instantes seleccionados en las playas portuguesas a la vez en todo el ámbito de la desembocadura, donde la descarga del río alcanza una influencia hasta gran profundidad en la zona del “Outer Shoal”, formación arenosa cuyo análisis se realizará más adelante.

En cambio, en los demás temporales, correspondientes a las Figura 4.2-15, Figura 4.2-16 y Figura 4.2-17, se observa una mayor influencia de la descarga del río en los instantes de vaciante, donde cabe mencionar la influencia de la existencia del dique, y una pequeña recogida de valores elevados aislados en la zona de las marismas y playa de Isla Canela.

Otro aspecto que destacar es la coincidencia de la zona hasta la que se puede observar la corriente procedente de la descarga del río con la zona donde se halla la formación del “Outer Shoal”. Por lo tanto, se

podría sacar como conclusión a priori antes del análisis de los resultados obtenidos en el estudio de la variabilidad de la batimetría en cuanto a sedimentación y erosión del fondo, en que dicha zona es propensa al cambio debido a su dinámica, ya que la velocidad de corriente está cercanamente y fuertemente ligada a los procesos que se estudiarán más adelante.

4.2.4 Influencia de Descarga del río

La descarga del río, tanto en su caudal como en su concentración de sólidos, forman parte del modelo de estudio en su simulación debido a tratarse de otro condicionante relevante a la hora de analizar la dinámica y comportamiento de la desembocadura. Dicha influencia va a ser estudiada tanto en la vía de navegación definida, como en el dominio que comprende la zona de estudio a la vez que se especifica en el comportamiento del “shoal” debido a su existencia.

4.2.4.1 Influencia en vía de navegación

La descarga del río tiene influencia en el canal de navegación tanto en la generación de corrientes, como en la “Depth Averaged velocity” y el cambio de la batimetría a lo largo de los periodos de simulación de cada uno de los temporales seleccionados.

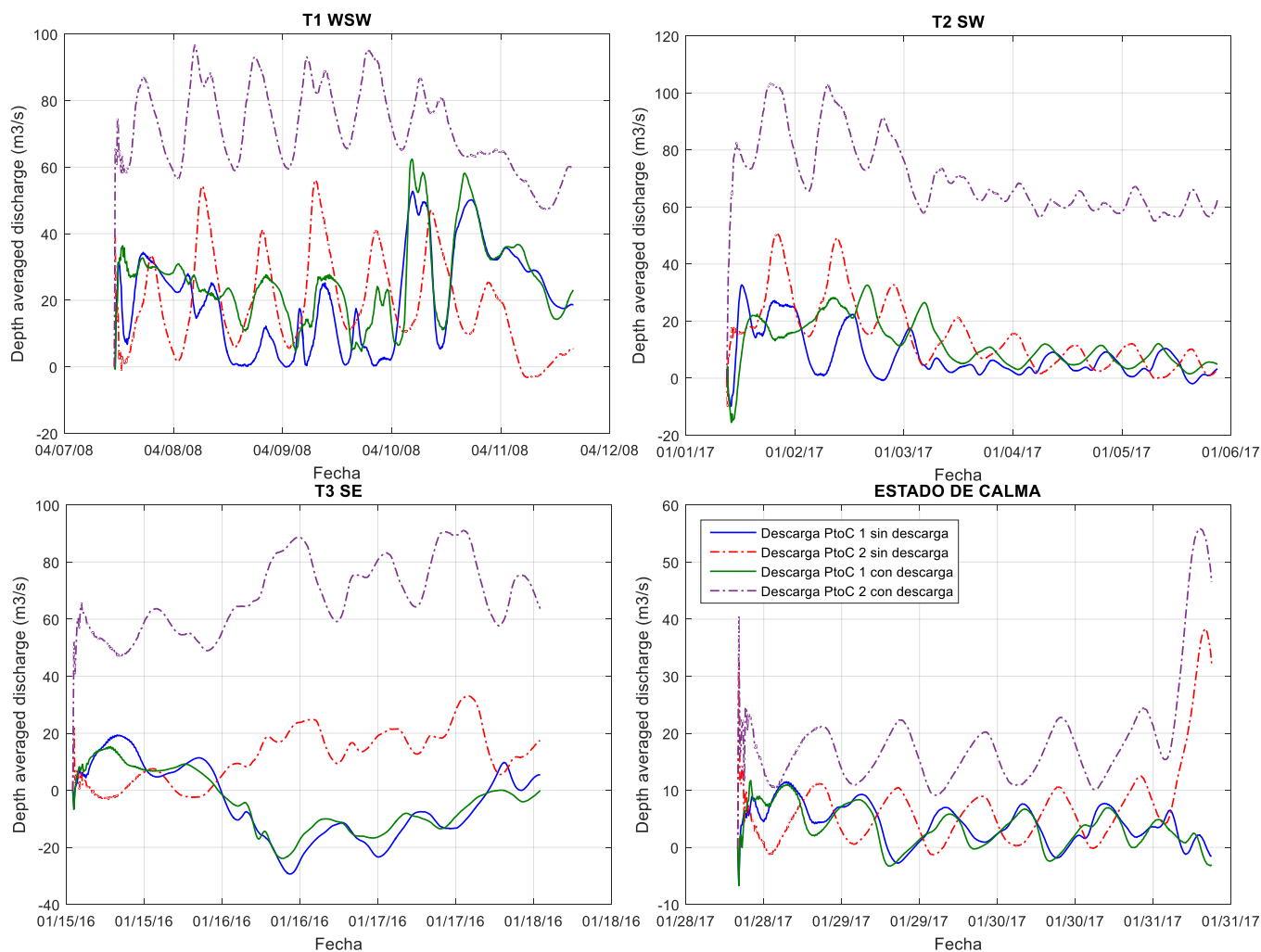


Figura 4.2-18. “Depth averaged discharge” en Puntos de Control 1 y 2 en los distintos escenarios de simulación de corta duración.

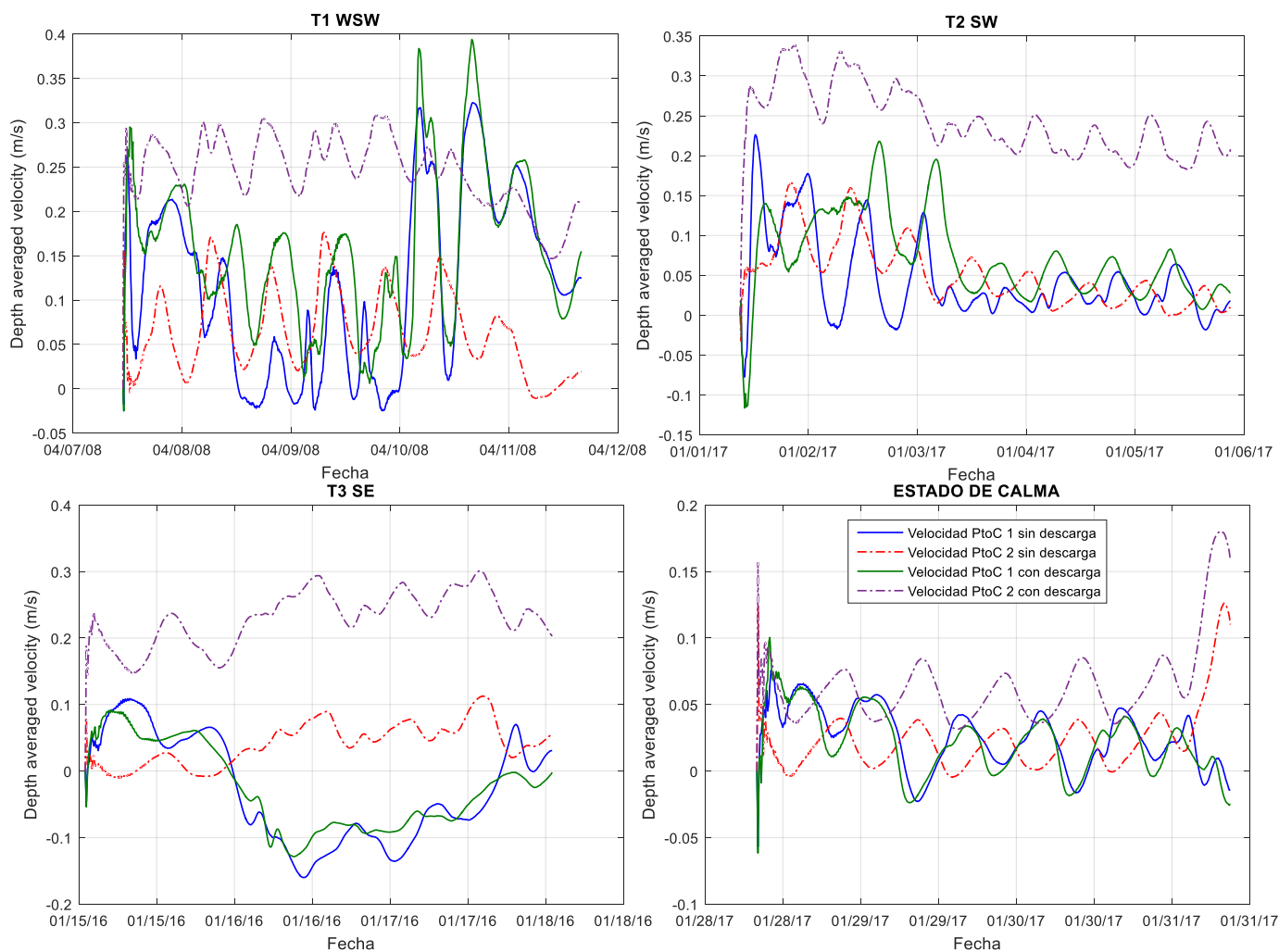


Figura 4.2-19. “Depth Averaged velocity” en Puntos de Control 1 y 2 en escenarios de simulación de corta duración.

La descarga del río es más acentuada en los periodos de vaciante, donde se observa que las magnitudes tienen valores más extremos con la descarga incluida en el modelo. Donde se encuentran más diferencias es en el “Punto de Control 2”, el cual se encuentra en una localización más incluida en la desembocadura. Dichos valores se tratan de oscilaciones más “limpias” ya que no se encuentran influenciados por el oleaje de cada uno de los temporales. En cambio, los valores representados correspondientes con el “Punto de Control 1”, se tratan de valores más caóticos e irregulares, donde se observa que las magnitudes representadas son influenciadas por factores como el oleaje, sobre todo en “T1” ya que se trata del temporal con valores de los parámetros del oleaje y velocidad del viento más intensos.

Para finalizar, en el “Estado de Calma” se observa una evolución de los valores mucho menos diferenciada y acentuada debido a que en dicha simulación, los valores de descarga tanto en caudal como en concentración de sedimentos es menor.

Por otro lado, la influencia de incluir la descarga del río en el modelo también puede analizarse desde el punto de vista comparativo entre los cambios en la batimetría a lo largo de las diferentes simulaciones. En la Figura 4.2-20 se representan los perfiles de batimetría una vez finalizados los temporales mencionados, en la que se puede observar la diferencia de la erosión o sedimentación acumulada en ambos casos con la batimetría inicial como base. Dichas diferencias no son relativamente notables, aunque se puede apreciar una mayor desviación en el temporal “T1”, que, como se ha mencionado ya anteriormente, se corresponde con la simulación donde los parámetros de oleaje y viento son las intensos.

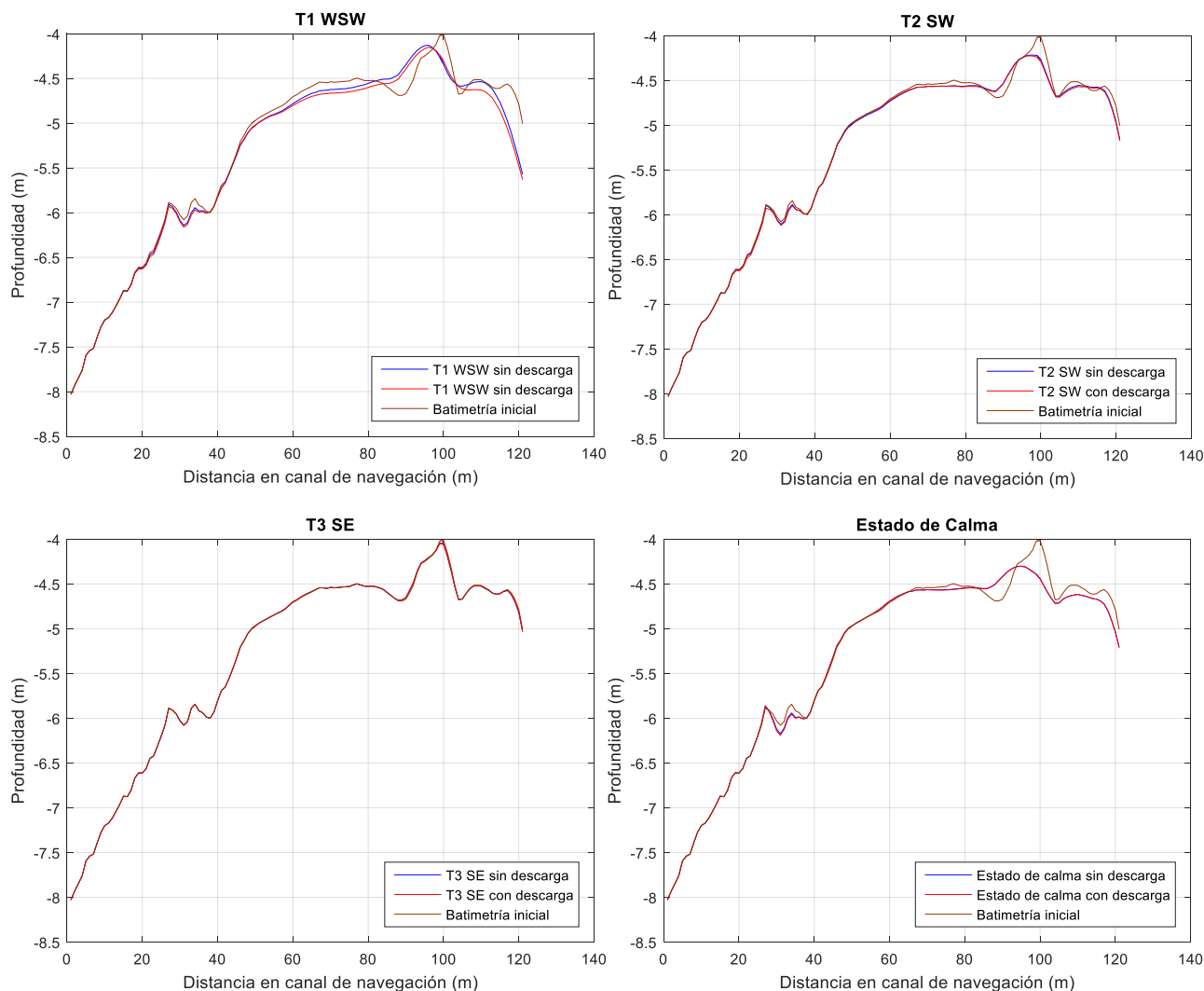


Figura 4.2-20. Representación comparativa del cambio de batimetría en función de incluir en el modelo la descarga del río en escenarios de simulación de corta duración.

A priori, se podría determinar o definir dicha diferencia como un movimiento del “shoal” hacia la bocana de la desembocadura que podría ser provocada por el encuentro de la corriente de descarga del río con la del oleaje intenso que se propaga en dirección contraria y concluyendo en una sedimentación más temprana de los sedimentos. Además, cabe mencionar por otro lado, la gran concentración de sedimentos incluida en la descarga del río, la cual como se observa en el siguiente apartado, hace que aumente la sedimentación en el dominio de estudio.

4.2.4.2 Influencia en el dominio

Otro punto de vista desde el que se puede tratar el análisis de la influencia de la existencia de la descarga del río en el modelo es su estudio a escala del dominio de estudio.

El caudal de descarga del río Guadiana en su desembocadura, como ya se ha mencionado y analizado anteriormente, es de gran importancia para conseguir el objetivo de generar un modelo más realista. Por otro lado, cabe destacar la concentración de sedimentos que dicho caudal contiene en su descarga, el cual provocará cambios en la dinámica de la zona de estudio (Tabla 4.2-11). Por lo tanto, es conveniente conocer el alcance de dicho sedimento de descarga en la zona de estudio, debido a que la generación de los depósitos de sedimentos

en la desembocadura puede, en parte ser provocados por dicho proceso (Figura 4.2-21).

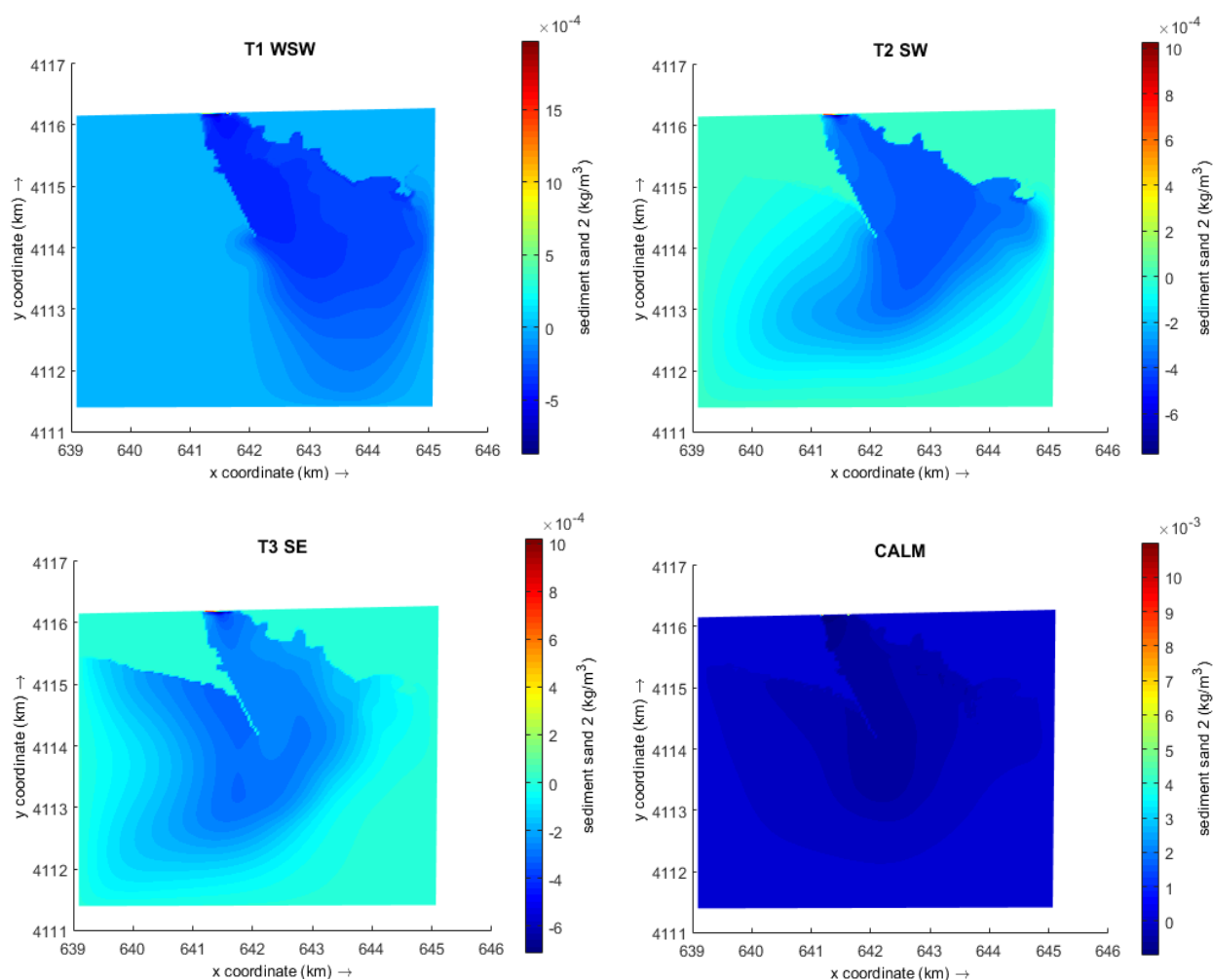
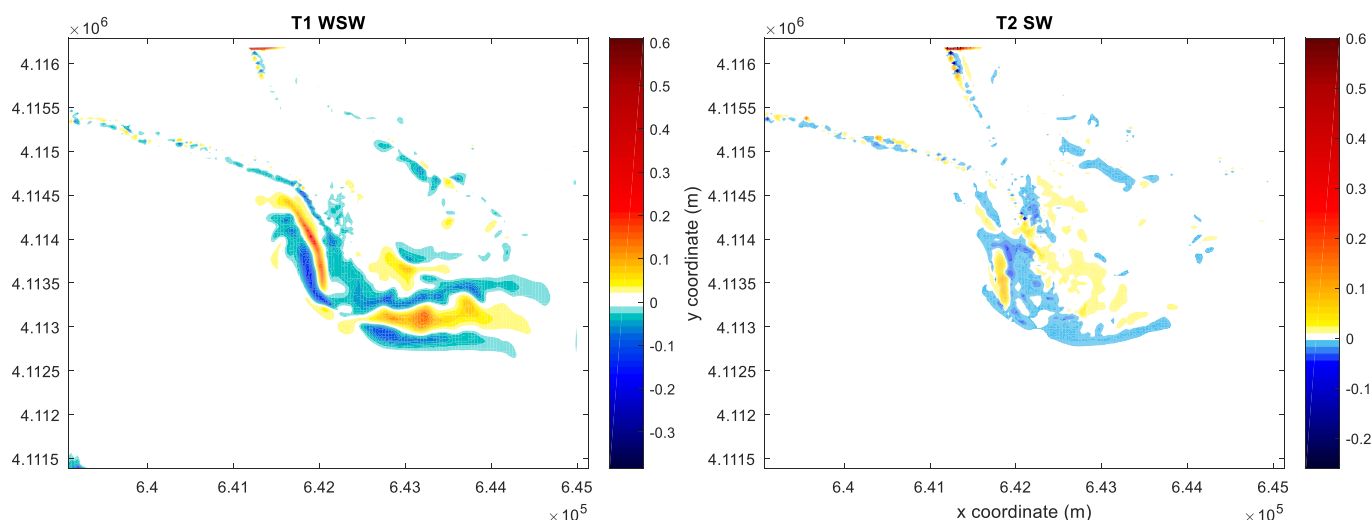


Figura 4.2-21. Representación del alcance del sedimento procedente de la descarga del río en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración.

Como se puede observar en la Figura 4.2-21, el alcance del sedimento procedente de la descarga depende de la intensidad de esta (ya que en el “Estado de Calma” tanto el caudal como la concentración es menor que en los temporales), y gran parte de las características del oleaje de cada uno de los temporales. En el caso del “T1”, se observa que el sedimento tiene un alcance mayor que en todos los demás escenarios de simulación, con una clara diferenciación en la dirección de su propagación debido a la dirección WSW proveniente de un oleaje intenso. Por otro lado, en el caso del “T2”, se tiene un alcance más homogéneo debido al oleaje más suave a lo largo de todo su periodo de simulación al igual que en el “T3”.



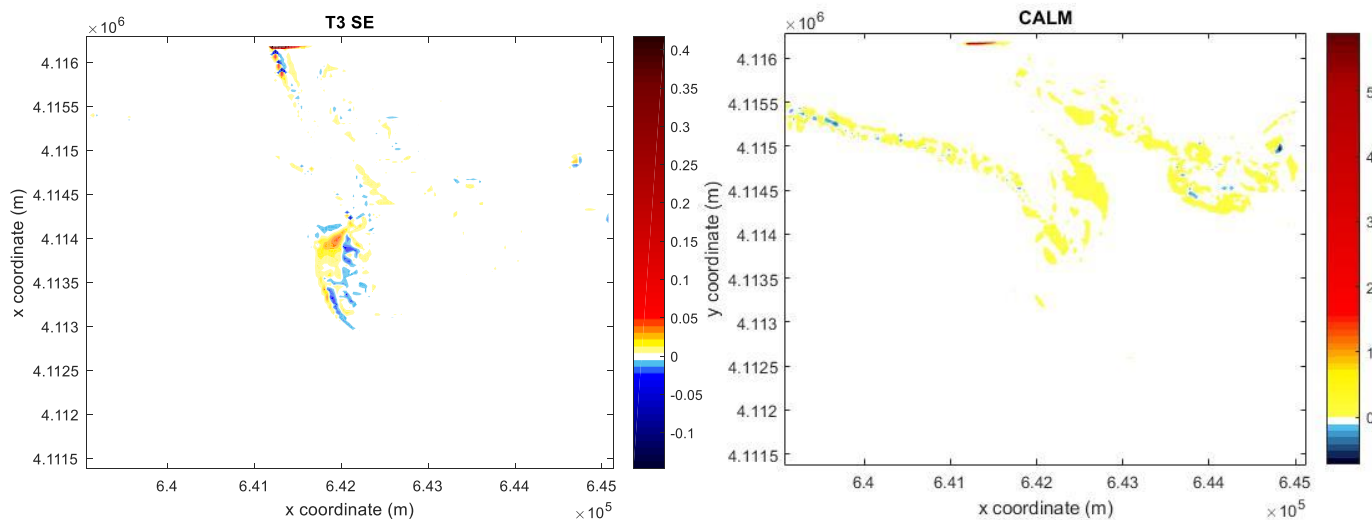


Figura 4.2-22. Diferencias de batimetrías finales en el dominio de estudio en función de la existencia de descarga del río en el modelo en escenarios de simulación de corta duración.

La influencia de la descarga del río se ha estudiado mediante el análisis de los cambios de batimetría generados por la existencia de dicha descarga, los cuales son representados en la Figura 4.2-22, además de la recopilación de los valores de los volúmenes acumulados de erosión y sedimentación en cada uno de los escenarios de simulación, en función de la ausencia de dicha descarga, la existencia de la misma sin aporte sólido e incluyendo la misma en la Tabla 4.2-11.

Por un lado, comenzando con el análisis de los resultados representados en la Figura 4.2-22, se confirma en cierto modo lo mencionado en el apartado anterior en cuanto al “T1”, caracterizándolo como la simulación donde dicha influencia se hace más notoria debido a sus condiciones de oleaje además, del movimiento del “shoal” hacia la bocana de la desembocadura como se ha mencionado también con anterioridad a través de una franja de sedimentación a lo largo de todo el emplazamiento más propenso a generarse el “shoal”, delimitado por ambas partes tramos donde abunda la erosión. En cuanto a las demás simulaciones, en “T2”, se pueden observar una zona de erosión suave, mientras que se destacan tramos y zonas aisladas de sedimentación y erosión en “T3” y sedimentación en el “Estado de Calma” a lo largo de toda la línea de costa del dominio.

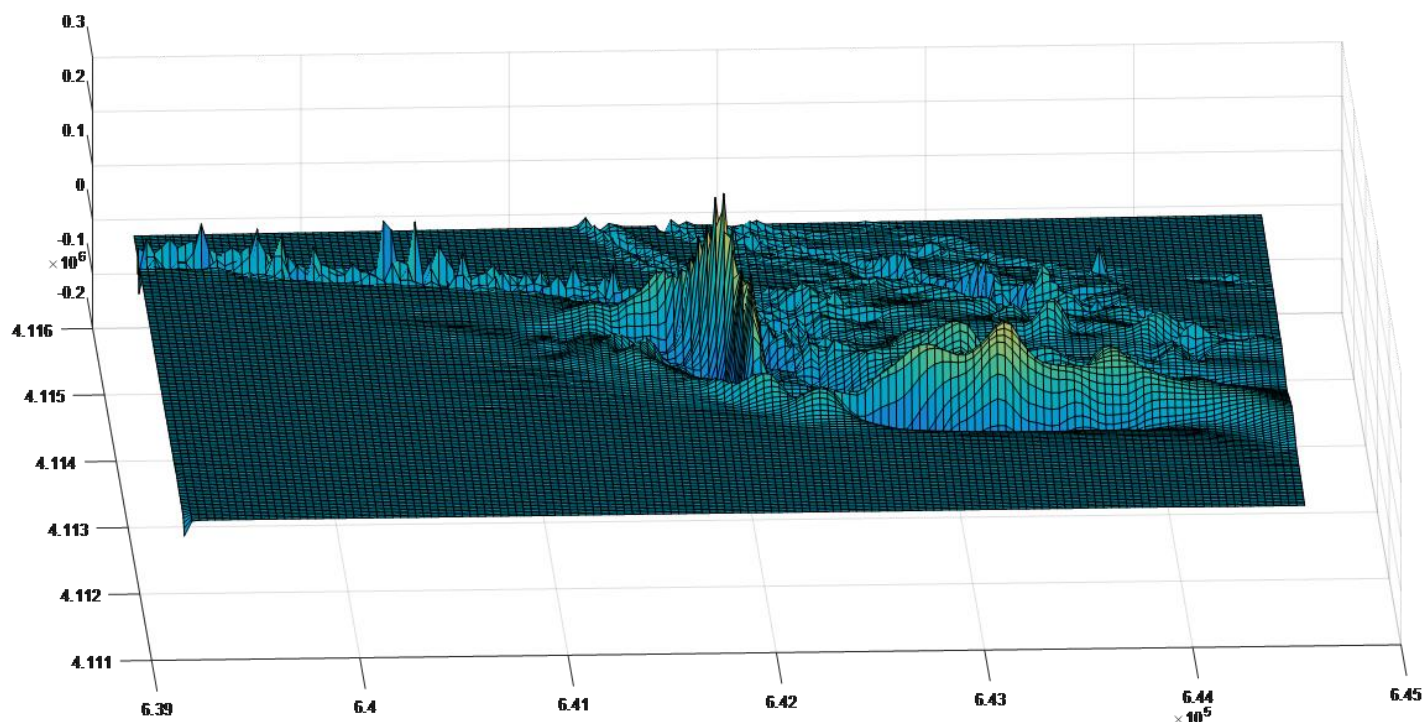


Figura 4.2-23. Representación 3D de la diferencia de la batimetría final en función de la existencia de descarga del río en el modelo en “T1”.

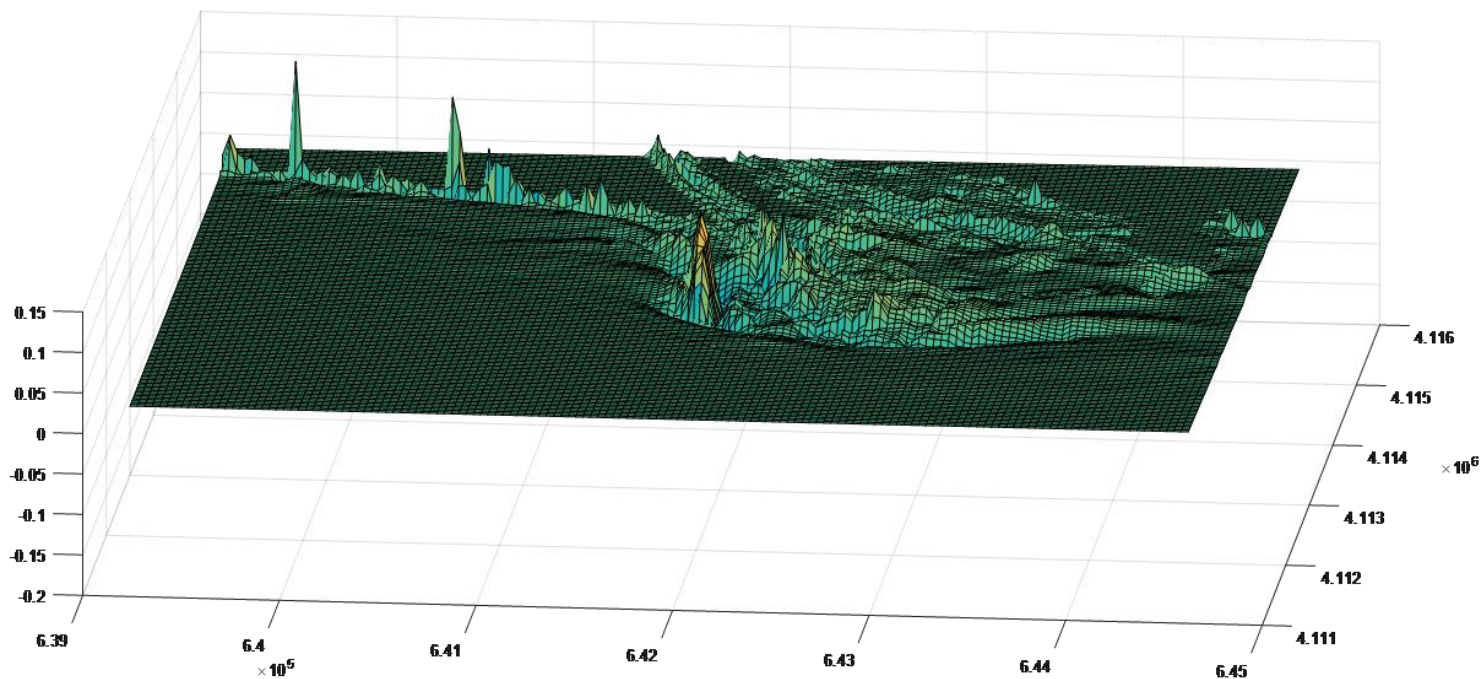


Figura 4.2-24. Representación 3D de la diferencia de la batimetría final en función de la existencia de descarga del río en el modelo en “T2”.

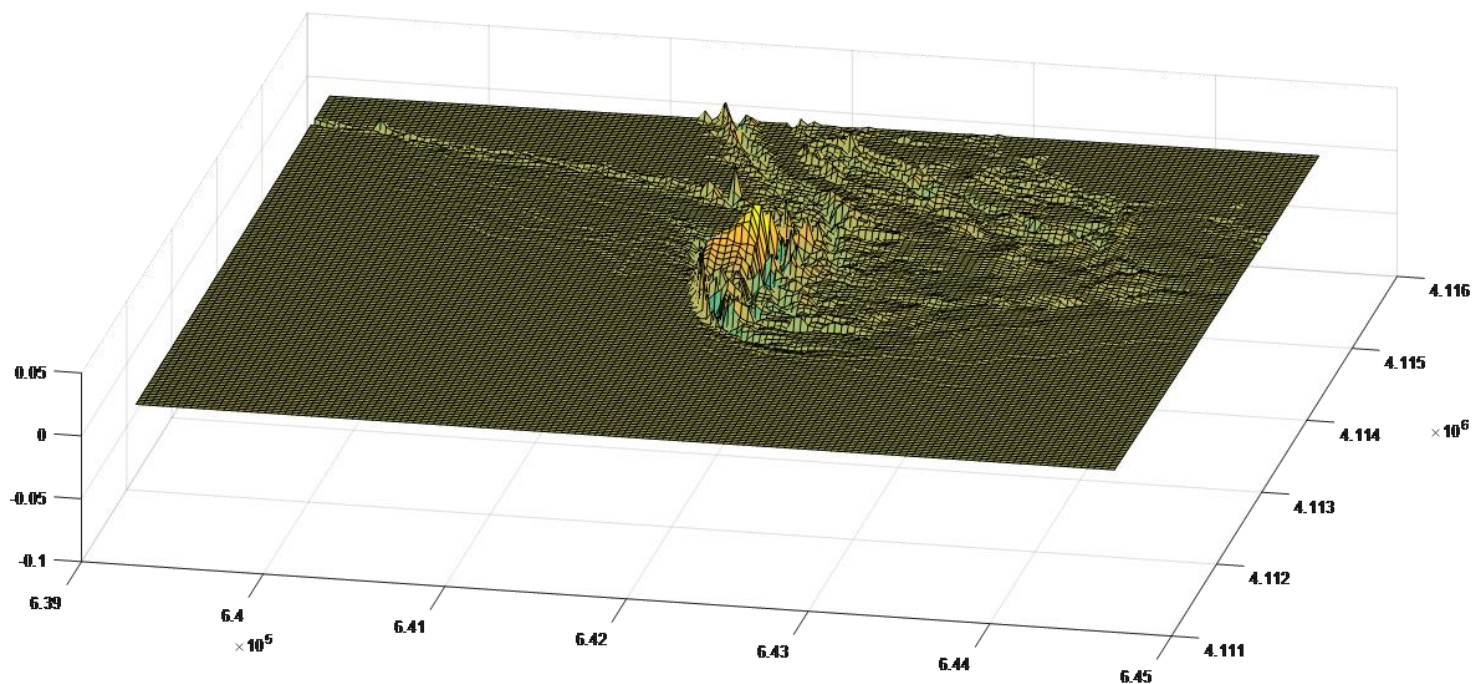


Figura 4.2-25. Representación 3D de la diferencia de la batimetría final en función de la existencia de descarga del río en el modelo en “T3”.

Por otro lado, realizando el análisis de forma paralela de la Tabla 4.2-11 y sacando conclusiones teniendo en cuenta el realizado tomando como base en la Figura 4.2-22, se observan que los escenarios en los cuales el volumen de sedimentos transportados es mayor, son “T1” y “Estado de Calma” sin importancia de tener en cuenta la existencia de la descarga; aunque, teniendo en cuenta el valor elevado del “factor de escala” en el “Estado de Calma” sus valores elevados se consideran lógicos llegando a la conclusión de que “T1” es el escenario donde la dinámica es más intensa. Comenzando por el mismo, se observa un aumento de la erosión cuando se tiene en cuenta la descarga sin aporte de sólidos y otro aumento cuando se tiene en cuenta dicha concentración del mismo modo que ocurre en la sedimentación. Esta casuística es de explicación lógica cuando se compara directamente el caso con ausencia de descarga y teniendo en cuenta la misma con aporte de sólidos. Un aumento de la erosión viene provocada debido a las grandes corrientes de descarga generadas en la desembocadura del río, que es acompañado a su vez de un aumento del volumen de relleno en el dominio por el aporte sólido del río.

	Erosión acumulada sin descarga	Erosión acumulada sin aporte de sólidos	Erosión acumulada con aporte de sólidos	Sedimentación acumulada sin descarga	Sedimentación acumulada sin aporte de sólidos	Sedimentación acumulada con aporte de sólidos
T1	-1.661.073	-1.663.509	-1.664.471	1.692.972	1.694.696	1.699.251
T2	-700.981	-703.525	-703.780	702.052	704.844	709.566
T3	-256.738	-259.354	-259.244	261.213	263.854	266.712
Estado de Calma	-1.833.664	-1.833.311	-1.834.492	1.815.637	1.816.063	1.862.996

Tabla 4.2-11. Volumen de sedimento en m³ de sedimentación y erosión acumuladas en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración.

Esta tendencia es seguida en todos los escenarios estudiados y simulados, la cual puede ser justificada con los aspectos mencionados anteriormente junto con la consideración de los parámetros o características del clima marítimo en cada uno de ellos. En cambio, el hecho del aumento de la erosión debido al aporte sólido del río y el aumento de la sedimentación al tener en cuenta la descarga sin aporte de sólido, son de justificación más compleja, debiéndose analizar en el siguiente apartado donde se analizan los volúmenes en cada una de las zonas definidas.

Diferencias en Erosión				Diferencias en Sedimentación		
	Sin descarga - Con descarga sin aporte de sólidos	Descarga sin aporte de sólidos - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Con descarga sin aporte de sólidos	Descarga sin aporte de sólidos - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Descarga con aporte de sólidos
T1	0,15%	0,06%	0,20%	0,10%	0,27%	0,37%
T2	0,36%	0,04%	0,40%	0,40%	0,67%	1,06%
T3	1,01%	-0,04%	0,97%	1,00%	1,07%	2,06%
Estado de Calma	-0,02%	0,06%	0,05%	0,02%	2,52%	2,54%

Tabla 4.2-12. Diferencia de porcentual de sedimentos en m³ de sedimentación y erosión acumuladas en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración.

También se destacan los volúmenes de sedimento procedentes de realizar un balance entre la cantidad de sedimento acumulado en erosión y sedimentación y, sobre todo, las grandes desviaciones que se obtienen al tener en cuenta la descarga en todas sus vertientes. Una predominancia de la erosión, correspondiéndose con un balance negativo, únicamente se da en el “Estado de Calma” en los casos de ausencia de descarga y existencia de descarga sin aporte de sólidos; por otro lado, en los demás casos se observa un balance positivo final donde la sedimentación prevalece. Aparte, se observan grandes cambios que demuestran la importante influencia analizada en este apartado sobre todo si se comparan los valores en ausencia de descarga y con descarga con aporte de sólidos como sobre todo, el aumento de sedimento existente en el “Estado de Calma” donde se observa claramente la influencia de la concentración de sólidos en la descarga a su vez que en “T2” y “T3”, donde dicho valor aumenta no de forma tan intensa pero si considerablemente (Tabla 4.2-13).

	Sin descarga		Con descarga sin aporte de sólidos		Con descarga con aporte de sólidos	
T1	31.900	1,88%	31.186	1,84%	34.780	2,05%
T2	1.072	0,15%	1.319	0,19%	5.787	0,82%
T3	4.475	1,71%	4.501	1,71%	7.468	2,80%
Estado de Calma	-18.027	-0,99%	-17.248	-0,95%	28.504	1,53%

Tabla 4.2-13. Balance del volumen de sedimentos en m³ y balance porcentual respecto a la sedimentación acumulada en el dominio de estudio en escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos.

Sin embargo, realizando un tratamiento de los resultados y obteniendo el balance de las diferencias entre los diferentes estados en cuanto a erosión y sedimentación acumulada, se observa que, como se ha mencionado anteriormente, la acción erosiva y sedimentaria aumenta en función de incluir la descarga y el aporte de sólidos, pero que, la acción de deposición de sedimentos lo hace con una tendencia más intensa. En la Tabla 4.2-14, un valor negativo se corresponde con el volumen excedente que ha sido depositado en función de la erosión, pudiéndose considerar que todo sedimento erosionado, es depositado en el dominio de estudio en su totalidad.

	Sin descarga - Con descarga sin aporte de sólidos	Descarga sin aporte de sólidos - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Descarga con aporte de sólidos
T1	2,29%	2,39%	-10,33%
T2	-18,77%	-18,45%	-77,20%
T3	-0,57%	0,44%	-39,74%
Estado de Calma	-4,52%	-4,54%	39,49%

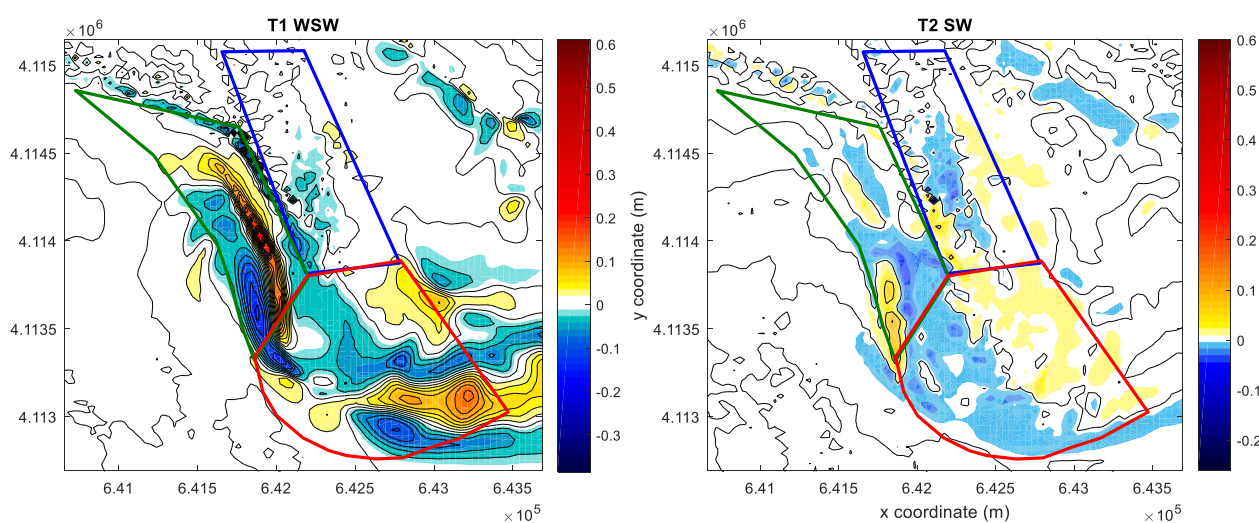
Tabla 4.2-14. Diferencia porcentual de los balances de volumen de sedimentos respecto al balance en el dominio de estudio en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos.

Como conclusión, se puede destacar para finalizar la gran importancia de tener en cuenta la descarga mencionada y analizada junto con el aporte de sólido que la acompaña, debido a que su consideración muestra un cambio destacable en la dinámica de la zona de estudio, donde el sedimento procedente del caudal saliente forma parte de las zonas de depósitos como se observa en la tercera columna de la Tabla 4.2-14 sobre todo en el “Estado de Calma”.

4.2.4.3 Influencia en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”

Para finalizar el análisis de la influencia de la descarga en el modelo, también es necesario realizar el análisis desde el punto de vista de los tres subdominios definidos en el apartado 3.3.8, en el cual se delimitan las zonas del “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”.

Realizando un tratamiento de los resultados se puede llegar a calcular los volúmenes acumulados de sedimento depositado y zonas erosionadas de cada una de las zonas mencionadas para realizar el balance final, y así, poder llegar a una conclusión firme de la influencia de la existencia de la descarga del río en el modelo, tanto en caudal como en concentración de sedimentos.



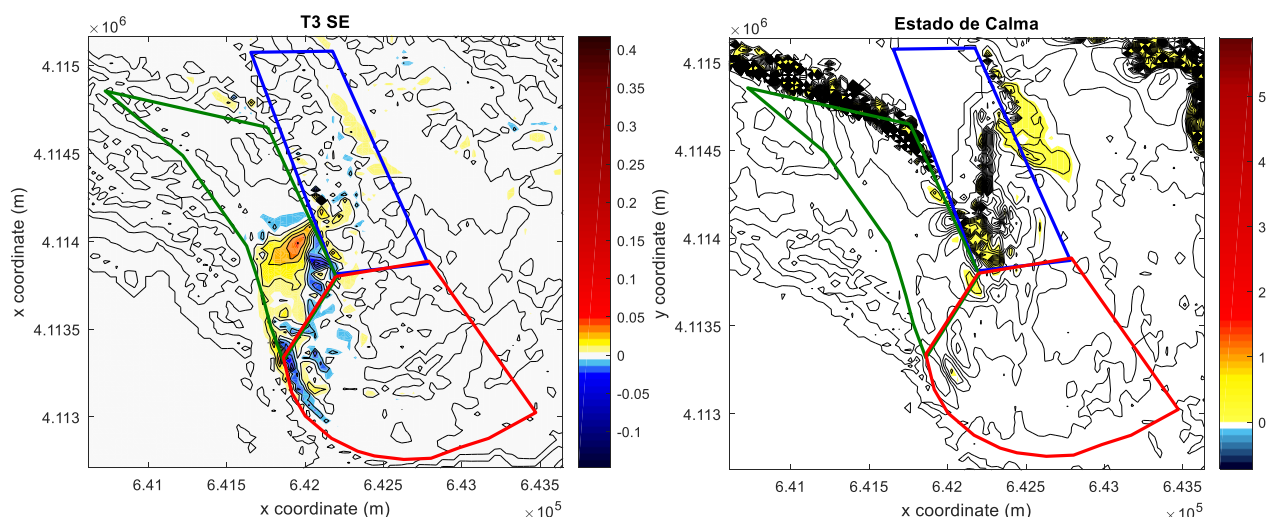


Figura 4.2-26. Representación de la erosión y sedimentación acumulada debido a la descarga del río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación.

	Erosión acumulada sin descarga	Erosión acumulada sin aporte de sólidos	Erosión acumulada con aporte de sólidos	Sedimentación acumulada sin descarga	Sedimentación acumulada sin aporte de sólidos	Sedimentación acumulada con aporte de sólidos
“Outer Shoal”						
T1	-207.788	-204.283	-204.178	226.928	225.208	225.071
T2	-83.701	-83.853	-83.848	59.822	59.326	59.314
T3	-18.402	-19.817	-19.820	8.178	8.378	8.379
Estado de Calma	-206.220	-206.749	-206.734	53.443	53.102	53.100
“Lateral Bar”						
T1	-152.649	-158.352	-158.379	195.739	203.146	202.718
T2	-79.947	-78.632	-78.664	55.456	53.357	53.381
T3	-20.881	-21.076	-21.077	7.530	8.431	8.426
Estado de Calma	-192.057	-192.466	-192.323	79.342	79.220	79.009
“Inlet Channel”						
T1	-23.399	-25.010	-25.009	18.292	18.077	18.089
T2	-11.400	-12.964	-12.968	8.198	10.404	10.404
T3	-2.065	-2.953	-2.957	1.437	2.310	2.313
Estado de Calma	-31.816	-32.134	-32.135	26.848	27.711	27.704
Balance Suma						
T1	-383.836	-387.645	-387.567	440.959	446.431	445.878
T2	-175.047	-175.449	-175.479	123.476	123.088	123.098
T3	-41.348	-43.847	-43.854	17.145	19.119	19.118
Estado de Calma	-430.093	-431.349	-431.191	159.633	160.033	159.813

Tabla 4.2-15. Volumen de sedimento en m³ de sedimentación y erosión acumuladas en el dominio de estudio en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos.

En la Figura 4.2-31 y en la Tabla 4.2-15 se representan y exponen los valores de la erosión y sedimentación acumulada en los escenarios de simulación en cada una de las zonas definidas objeto de análisis en este apartado en función de la existencia de descarga y aporte de sólidos o no.

Comenzando con el análisis del “Outer Shoal”, se corresponde con una zona delimitada en la cual la existencia de descarga sin aporte de sólidos disminuye la erosión en todos los escenarios, sobre todo en el “Estado de Calma”, menos en “T1” que aumenta con más intensidad. Dicho proceso puede ser debido, de forma hipotética, a la mayor acción en “T1” del oleaje en la dirección predominante WSW, que, al encontrarse con la descarga mencionada en dicho emplazamiento, provoque una sedimentación mayor del sedimento procedente de la misma debido a la compensación de las velocidades de corriente en las dos direcciones. En cambio, debido

a los parámetros menos intensos en cuanto al clima marítimo de los demás temporales o escenarios mencionados, la acción de la descarga del río sea mayor que la que la contrarrestaría por la acción del oleaje produciéndose así una mayor acción erosiva.

Balance sin descarga			Balance sin aporte de sólidos		Balance con aporte de sólidos	
"Outer Shoal"						
T1	19.140	4%	20.925	5%	20.893	5%
T2	-23.879	-19%	-24.526	-20%	-24.534	-20%
T3	-10.224	-60%	-11.440	-60%	-11.441	-60%
Estado de Calma	-152.777	-96%	-153.647	-96%	-153.634	-96%
"Lateral Bar"						
T1	43.090	10%	44.794	10%	44.339	10%
T2	-24.490	-20%	-25.275	-21%	-25.283	-21%
T3	-13.350	-78%	-12.645	-66%	-12.651	-66%
Estado de Calma	-112.715	-71%	-113.246	-71%	-113.313	-71%
"Inlet Channel"						
T1	-5.107	-1%	-6.933	-2%	-6.920	-2%
T2	-3.202	-3%	-2.560	-2%	-2.564	-2%
T3	-628	-4%	-643	-3%	-644	-3%
Estado de Calma	-4.968	-3%	-4.423	-3%	-4.431	-3%
Balance Suma						
T1	57.123	13%	58.786	13%	58.312	13%
T2	-51.571	-42%	-52.361	-43%	-52.381	-43%
T3	-24.203	-141%	-24.728	-129%	-24.736	-129%
Estado de Calma	-270.460	-169%	-271.316	-170%	-271.378	-170%

Tabla 4.2-16. Balance de volumen de sedimento en m³ y porcentual respecto a la sedimentación acumulada en las zonas "Outer Shoal", "Lateral Bar" y "Inlet Channel" en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos.

Continuando con el "Lateral Bar", se observa un aumento bastante considerable de la erosión en "T1" debido únicamente a la existencia de la descarga del río como caudal de agua, siendo de menor intensidad en los escenarios "T3" y "Estado de Calma". En cambio, en el escenario "T2" se produce un aumento de esta que podría ser provocado por la misma descarga del río. Teniendo en cuenta el aporte de sólido, se demuestra que disminuye del mismo modo la erosión en la gran mayoría de los escenarios, pero de forma más suave. En cuanto a la acción sedimentaria, se pronuncia con gran intensidad en "T1" por la existencia de la descarga sin aporte de sólidos, la cual disminuye posteriormente con dicho aporte del mismo modo que en los escenarios "T3" y "Estado de Calma" pero de forma más suave. En cuanto al comportamiento en "T2", se destaca una disminución bastante significativa de la acción erosiva debido a la existencia de la descarga.

Concluyendo, en cuanto al comportamiento en el "Inlet Channel", se podría destacar la poca influencia del aporte sólido del río, ya que la influencia más significativa en cuanto al aumento o disminución de la acción erosiva o sedimentaria en dicha zona se corresponde con la existencia de la descarga del río únicamente como caudal de agua. En cuanto a dicho análisis, todos los escenarios se comportan de la misma manera, en la que se produce un aumento de la erosión a la vez de un aumento de la sedimentación.

Aprovechando el tratamiento de los resultados realizado, y para finalizar con el análisis, se realiza un estudio mediante el balance de las diferencias en función de la existencia de la descarga del río con aporte de sólidos o no para poder llegar al conocimiento del transporte local hipotético debido a dicha influencia entre las zonas delimitadas y definidas en este apartado.

Como se ha mencionado anteriormente, realizando un tratamiento de los resultados obtenidos junto con los balances realizados a lo largo del análisis desarrollado en este apartado, se ha llegado a la conclusión del transporte local de sedimentos debido a la influencia de la descarga del río entre las tres zonas delimitadas y definidas. Para ello, se ha tomado como hipótesis de partida que, a la finalización de cada uno de los escenarios propuestos y estudiados, todo sedimento erosionado en cada una de las zonas es depositado en ella o, en su defecto, en alguna de las zonas contiguas. Dicha hipótesis no genera unas conclusiones con un grado de precisión alto, ya que no se tiene en cuenta el posible cambio en la dinámica del dominio de estudio o la existencia del transporte de entrada y salida de sedimentos desde zonas del dominio que no se encuentran abarcadas en las tres definidas y analizadas en este apartado. Sin embargo, se ha considerado que proporcionan unas conclusiones válidas a la hora de un conocimiento cualitativo de la influencia de la descarga en el modelo.

	Diferencias en Erosión			Diferencias en Sedimentación		
	Sin descarga - Con descarga sin aporte de sólidos	Descarga sin aporte de sólidos - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Con descarga sin aporte de sólidos	Descarga sin aporte de sólidos - Descarga con aporte de sólidos	Sin descarga - Descarga con aporte de sólidos
Outer Shoal						
T1	0,9%	0,0%	0,9%	-0,4%	0,0%	-0,4%
T2	-0,1%	0,0%	-0,1%	-0,4%	0,0%	-0,4%
T3	-3,2%	0,0%	-3,4%	1,0%	0,0%	1,2%
Estado de Calma	-0,1%	0,0%	-0,1%	-0,2%	0,0%	-0,2%
“Lateral Bar”						
T1	-1,5%	0,0%	-1,5%	1,7%	-0,1%	1,6%
T2	0,7%	0,0%	0,7%	-1,7%	0,0%	-1,7%
T3	-0,4%	0,0%	-0,5%	4,7%	0,0%	5,2%
Estado de Calma	-0,1%	0,0%	-0,1%	-0,1%	-0,1%	-0,2%
“Inlet Channel”						
T1	-0,4%	0,0%	-0,4%	0,0%	0,0%	0,0%
T2	-0,9%	0,0%	-0,9%	1,8%	0,0%	1,8%
T3	-2,0%	0,0%	-2,2%	4,6%	0,0%	5,1%
Estado de Calma	-0,1%	0,0%	-0,1%	0,5%	0,0%	0,5%
Balance Suma						
T1	0,98%	-0,02%	0,96%	1,23%	-0,12%	1,10%
T2	0,23%	0,02%	0,25%	-0,32%	0,01%	-0,31%
T3	5,70%	0,02%	5,71%	10,32%	-0,01%	10,32%
Estado de Calma	0,29%	-0,04%	0,25%	0,25%	-0,14%	0,11%

Tabla 4.2-17. Diferencia porcentual de volumen de sedimento de sedimentación y erosión acumuladas respecto a la sedimentación acumulada en las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en función de la existencia de descarga y de aporte de sólidos.

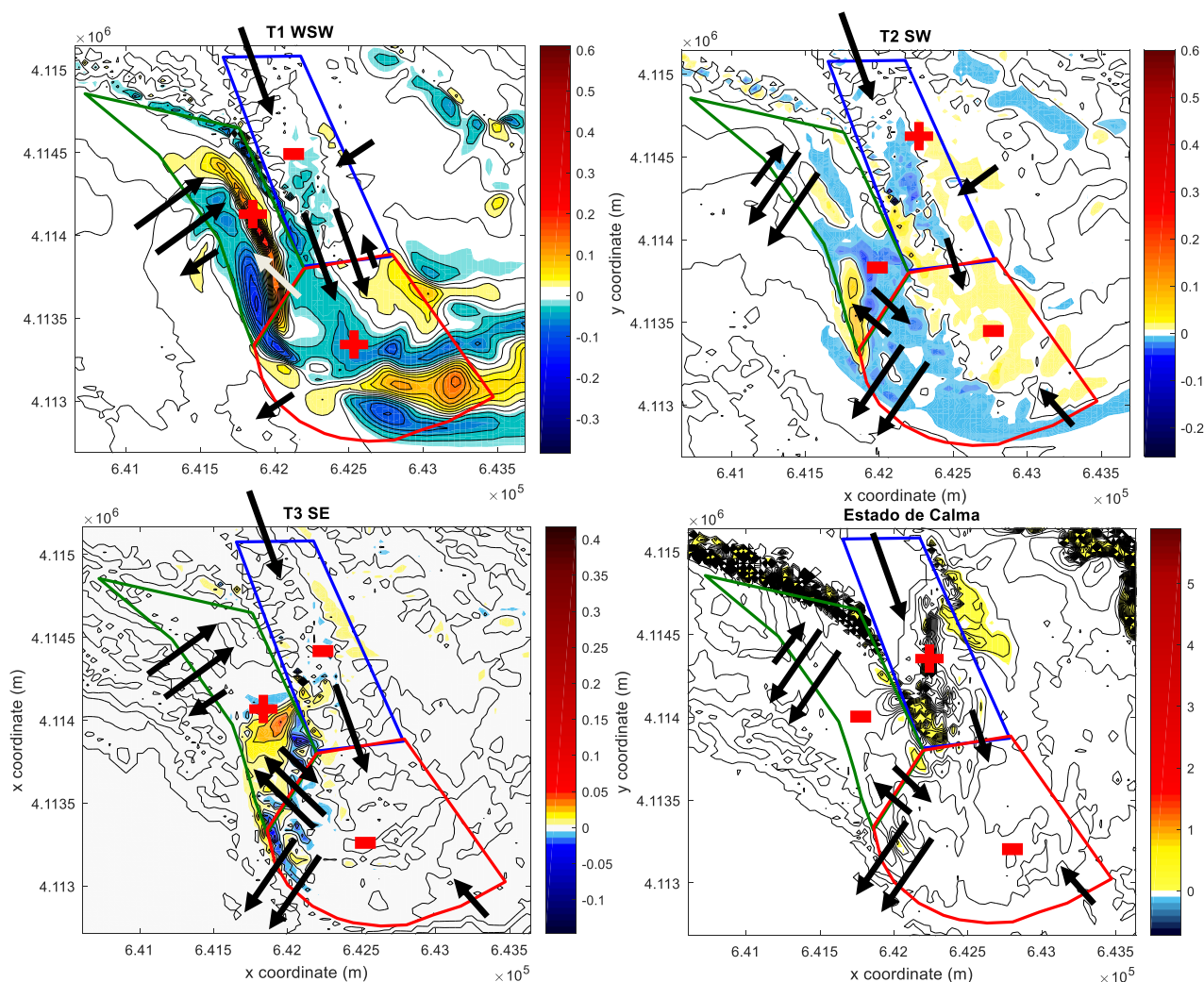


Figura 4.2-27. Representación de la erosión y sedimentación acumulada río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” debido a la influencia de la

descarga en cada uno de los escenarios de simulación. El transporte hipotético se encuentra representado mediante flechas con longitudes proporcionales a su magnitud además del signo del balance de cada zona descrita, significando el “signo +” una ganancia de sedimentos en la misma.

Comenzando por “T1”, se obtiene un balance final positivo en las zonas “Outer Shoal” y “Lateral Bar” y negativo en la restante, lo que significa una sedimentación en dichas zonas y una erosión en “Inlet Channel”. Por lo tanto, se podría considerar que de la concentración de sedimentos que contiene la descarga del río no se sedimenta en “Inlet Channel” sino que pasa a las otras dos zonas. Como se ha mencionado anteriormente, dicha casuística podría ser provocada por la compensación de la corriente procedente de la descarga y la procedente del oleaje, provocando una deposición de los sedimentos mencionados en dichas zonas.

Siguiendo por “T2”, se obtiene unos balances finales de signo contrario al temporal anterior. En este caso, se podría considerar que parte del volumen de sedimentos procedente de la descarga del río se deposita en la zona “Inlet Channel” y que el resto, se desplaza a zonas del dominio no abarcadas por las dos zonas delimitadas restantes. Como conclusión, se podría mencionar que la dirección media predominante del oleaje en este temporal, SW, se corresponde con una dirección de entrada más directa hacia la bocana de la desembocadura, por lo que es en la zona “Inlet Channel” donde la corriente del oleaje se encuentra con la corriente procedente de la descarga, produciéndose una compensación y provocándose una sedimentación de dicho material en la zona mencionada. Este caso no se observa en el temporal “T1” debido a que el oleaje se propaga en dirección perpendicular al dique encontrado en la boca de la desembocadura, impidiendo la entrada de las corrientes ni del oleaje la zona más interna de la desembocadura.

Por otro lado, comentando el temporal “T3”, se observa un balance positivo final únicamente en la zona “Lateral Bar”. En este caso, se toma como unos resultados lógicos, debido a que gran parte de los sedimentos procedentes de la descarga son transportados hacia dicha zona debido a la dirección media predominante de dicho temporal, SE; transportándose la parte restante de la misma hacia zonas no abarcadas por las otras dos zonas delimitadas.

Por último, en cuanto al escenario de “Estado de Calma”, se obtienen unos signos iguales a los encontrados en “T2”, donde predomina la sedimentación en la zona “Inlet Channel” mientras que en las zonas “Outer Shoal” y “Lateral Bar” destaca la erosión. Dichos resultados podrían justificarse con el valor inferior de la descarga en este escenario que, en el resto, por lo que podría considerarse, ya que el dominio de descarga en el modelo es el mismo que en el resto de las simulaciones, que debido al menor caudal y menor velocidad de la descarga del río se produce una deposición de los sedimentos procedentes de la misma.

Para finalizar, se podría mencionar la relevante influencia de la descarga del río en cuanto a caudal y aporte sólido al dominio de estudio, el cual tiene participación en la formación de los diferentes elementos y bajos en la desembocadura, a la vez que un importante cambio en la dinámica de la zona tanto en el transporte de sedimentos como en las corrientes.

4.2.5 Influencia del Oleaje

El análisis de los resultados del modelo se puede realizar también desde el punto de vista de la influencia del oleaje. Del mismo modo que en el apartado anterior, se realiza un estudio de la influencia mencionada a tres escalas: en la vía de navegación, en el dominio de estudio y en la generación del “shoal” teniendo en cuenta la diferenciación y definición de los cuatro escenarios de simulación descritos en el apartado 3.3.8.

4.2.5.1 Influencia en vía de navegación

La influencia del oleaje en la vía de navegación se va a llevar a cabo mediante la comparación de los valores interpolados de la batimetría al final de cada uno de los escenarios de simulación (Figura 4.2-28).

De forma general, se puede observar a priori una batimetría inicial acentuada, con cambios bruscos en su profundidad en las zonas comprendidas entre los 20 y 40 m y a los 100 m longitudinales recorriendo el canal de navegación definido donde nos encontramos el “Outer Shoal” en forma de envolvente a la boca de la desembocadura.

La erosión y sedimentación acumulada a lo largo de la vía de navegación representa claramente una influencia del oleaje y de las condiciones del clima marítimo en el comportamiento dinámico de la desembocadura. Como se puede observar, el tramo comprendido entre el inicio de la vía de navegación

(considerado como el punto más cercano a la boca de la desembocadura) y los 30 m, se caracteriza por una batimetría constante en los escenarios de simulación, donde no se aprecia modificación alguna. En cambio, a partir de ese punto es donde se comienzan a identificar variaciones en función del escenario.

Posteriormente, entre los 30 y 40 m, se encuentra una zona con una batimetría inicial irregular, donde se observan zonas de erosión sobre todo en los escenarios “T1” y “Estado de Calma”, seguido de un tramo que abarca hasta los 80 m, con una erosión considerable identificada en “T1”.

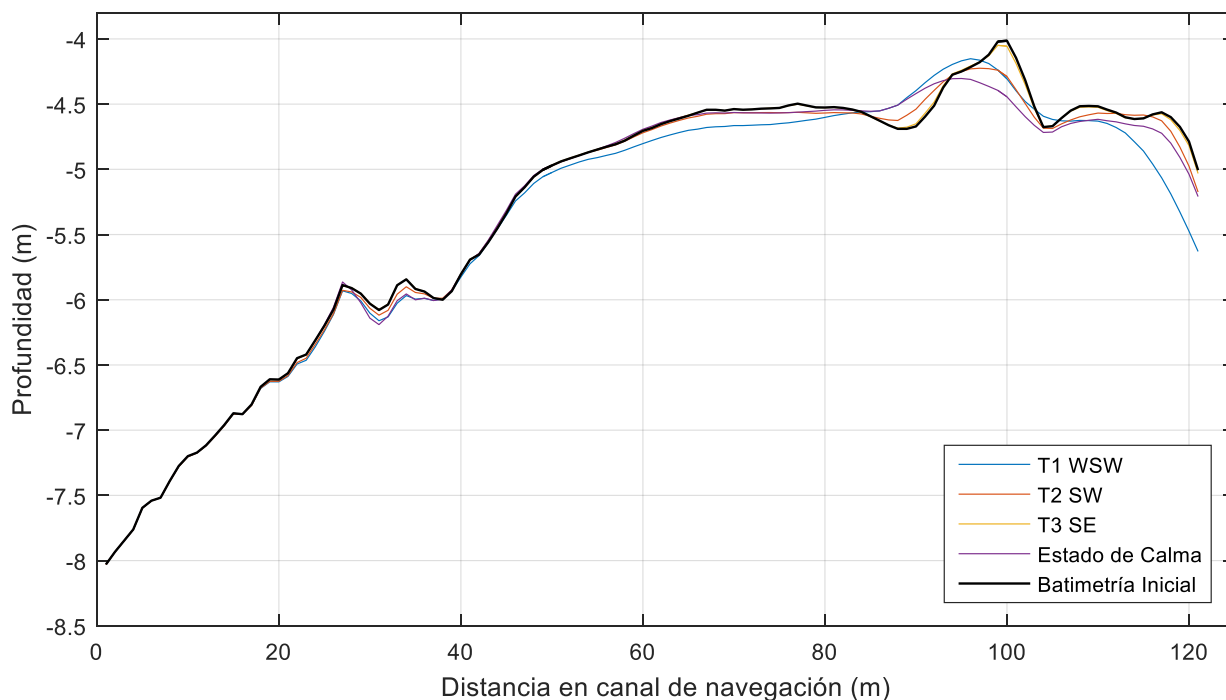


Figura 4.2-28. Representación de las Batimetrías finales en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración.

A partir de los 80 m longitudinales del canal de navegación hasta el final de este se identifican los mayores cambios en la batimetría, correspondiéndose con el cruce con el “Outer Shoal” y la entrada a la boca de la desembocadura delimitada por el dique (Figura 4.2-29). En dicho tramo, se comienza observando una batimetría con el shoal más pronunciado, donde la tendencia de los temporales es causar una dinámica donde se producen sedimentaciones en zonas más profundas y erosiones en las zonas con menos calado; llegando a una batimetría modificada final más suave.

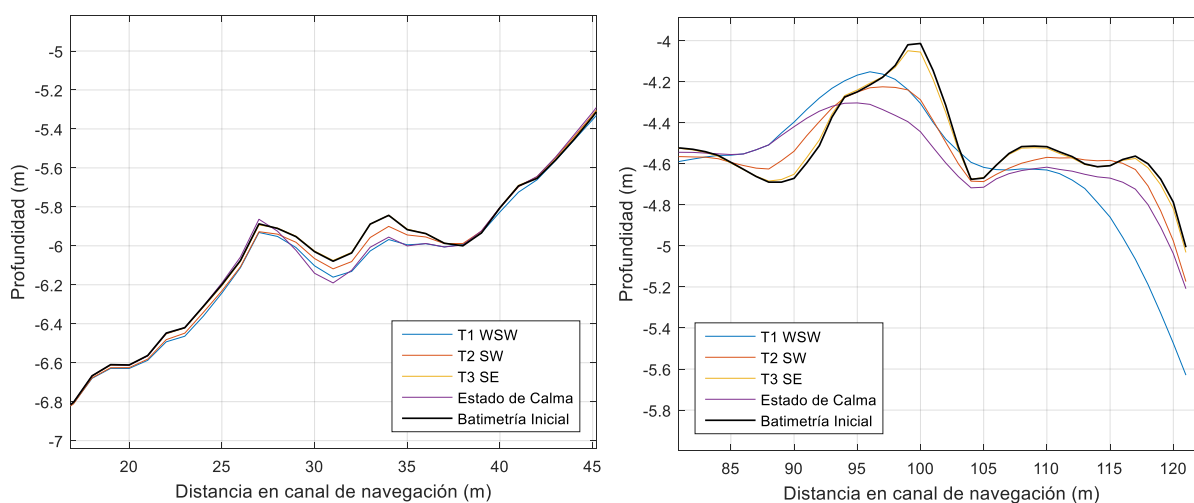


Figura 4.2-29. Representación de las Batimetrías finales en cada uno de los escenarios de simulación de corta duración en zonas con mayor relevancia.

Comenzando con el “T1”, se observa un cambio sobre los 85 m donde se pasa de erosión a sedimentación, acumulando gran parte de sedimento en la zona con más profundidad que se ubica en los 90 m. Esta tendencia sedimentaria, vuelve a cambiar sobre los 97 m erosionando gran parte del banco existente en a batimetría inicial. Este cambio mencionado de erosión a sedimentación puede ser considerado como un movimiento del shoal hacia la bocana de la desembocadura a la vez que ha sido suavizado en cuanto a su perfil. Finalmente, se produce un pequeño relleno en el ámbito una vez sobrepasado dicho bajo terminando el canal de navegación con una gran erosión.

En cuanto al “T2”, se encuentran tanto sedimentaciones como erosiones mucho menores que en el escenario anterior tanto en el cruce con el shoal como en la entrada a la boca de la desembocadura. En cambio, también se identifica un traslado de este hacia agua profundas, con menor calado y menos relleno que en “T1” lo que concluye con un mayor traslado de sedimentos ya que se puede considerar que en el caso anterior gran parte de la erosión producida en el banco, ha sido depositada como sedimentación en el relleno mencionado justo antes.

Por otro lado, realizando un análisis de los resultados del “T3” se llega a la conclusión de que es un temporal cuyas características en cuanto al oleaje y al clima marítimo no provocan un cambio destacable a lo largo de la batimetría exportada en el canal de navegación definido.

Para finalizar, el “Estado de Calma” se corresponde con el escenario de simulación que se puede caracterizar por su fuerte tendencia a la suavidad. Se encuentran zonas de grandes erosiones en el shoal y relleno mediante sedimentación en las zonas que lo delimitan.

A modo de análisis cualitativo, se ha representado en la Figura 4.2-30 la magnitud de erosión o sedimentación acumulada monodimensional a lo largo del canal de navegación. Dicha magnitud y caracteriza por ser muy intuitiva para el conocimiento del comportamiento dinámico a lo largo del mismo.

Como se puede observar, se pueden destacar cuatro zonas ya mencionadas anteriormente. Se comienza con el tramo que abarca entre los 20 y 40 m de recorrido longitudinal en los que en todos los escenarios se observa una cantidad de sedimento negativa, o lo que es lo mismo, una predominancia de erosión en dicha zona. El segundo tramo por mencionar es el que abarca desde los 40 m hasta los 80, donde en casi todos los escenarios se identifica una “recuperación” de sedimentos relativa, aunque en el “T1” se observa una tendencia a la predominancia de nuevo en erosión en la finalización del tramo. El siguiente tramo se corresponde con el “Outer Shoal”, comprendido ente los 80 y 100 m, donde se observa el gran relleno en la zona más cercana a la boca de la desembocadura antes del shoal con abundante sedimentación. Posteriormente se observa la gran erosión de este, seguido de un relleno más débil que el anterior. Finalmente, se finaliza el recorrido del canal de navegación con una erosión significativa sobre todo el “T1”.

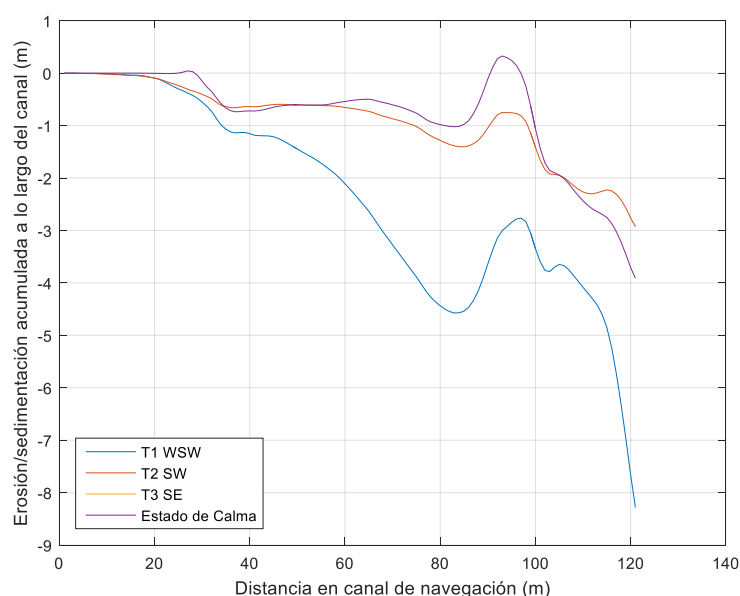


Figura 4.2-30. Erosión o sedimentación lineal acumulada a lo largo del canal de navegación en escenarios de simulación de corta duración.

Como conclusión, se podría determinar mencionando la importante tendencia erosiva de los escenarios de simulación, siendo más abundantes en cuanto a cantidad y recorrido las zonas donde se produce un aumento de la profundidad sobre todo en las zonas con la batimetría más irregular. Se destaca el movimiento hacia la boca de la desembocadura del shoal sobre todo el “T1” y en “Estado de Calma”. Además, realizando el balance cualitativo descrito anteriormente, se llega a la conclusión que, en todos los escenarios, se tiene un balance negativo de sedimentos, el cual se estudiará de forma menos puntual en el análisis del dominio de estudio en cuanto a la influencia del oleaje.

4.2.5.2 Influencia en el dominio de estudio

Otro punto de vista desde el que se puede estudiar la influencia del oleaje es a escala del dominio de estudio. Desde dicha perspectiva, se puede observar de forma más global el comportamiento de la desembocadura mediante un análisis de los resultados obtenidos mediante el modelo generado.

Como se puede observar, el comportamiento del modelo, en cierto modo depende del escenario o temporal simulado. En función de la dirección predominante del oleaje junto con sus parámetros y el resto de las características locales del clima marítimo, se obtienen cambios en la batimetría y transporte de sedimentos con una dinámica diferente (Figura 4.2-31). Del mismo modo, el análisis de estos resultados obtenidos en función de las condiciones del oleaje posibilita realizar un estudio hipotético de determinación del transporte local de los sedimentos como se expondrá más adelante.

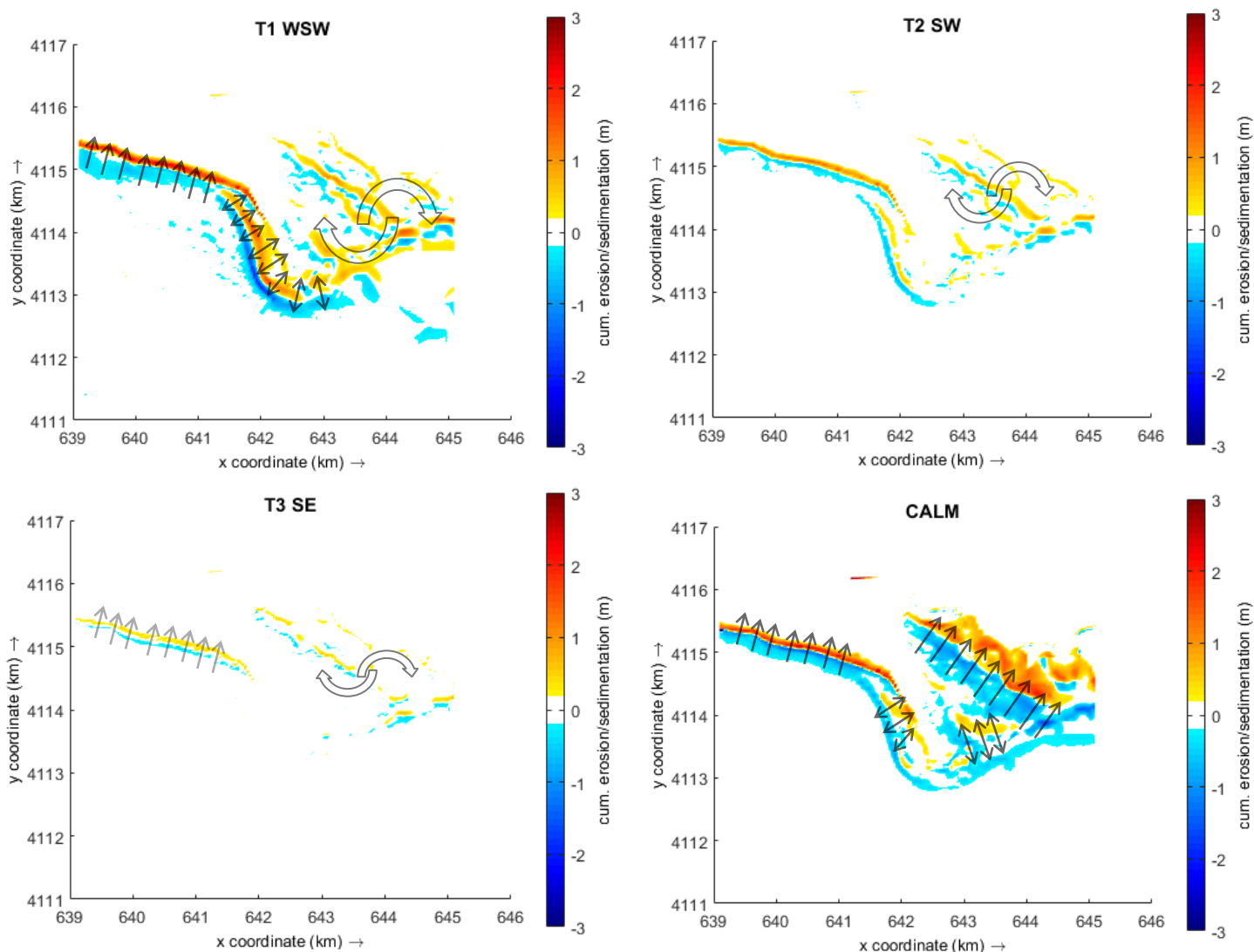


Figura 4.2-31. Erosión o sedimentación acumulada en el dominio de estudio en función de la dirección predominante del oleaje.

Comenzando por el “T1”, se observa una batimetría final con grandes modificaciones con respecto a la inicial, siendo uno de los dos escenarios en los cuales se encuentra mayor volumen de transporte de sedimentos (Tabla 4.2-18), en la cual se puede deducir de manera intuitiva los transportes locales de sedimentos en el emplazamiento. Por un lado, se observa una gran sedimentación en la zona costera portuguesa la cual se encuentra adyacente con una zanja erosiva. Dicha zona tiene una continuidad hasta la zona del dique, prolongándose hasta la zona de “Lateral Bar” y “Outer Shoal”. En cambio, en la zona más cercana a la costa española, se encuentran zonas de erosión y sedimentación aisladas y con una irregularidad en cuanto a su formación.

Dichas formaciones se podrían complementar con las conclusiones a priori de que el sedimento erosionado en la costa portuguesa es transportado hacia dicha costa componiendo casi la totalidad de la sedimentación mencionada anteriormente además del traslado de la “Lateral Bar” con continuidad hacia la zona del “Outer Shoal” hacia la boca de la desembocadura. En cuanto a las zonas aisladas en el entorno de la costa española, se llegarán a las conclusiones con el análisis más preciso abarcado en el siguiente apartado.

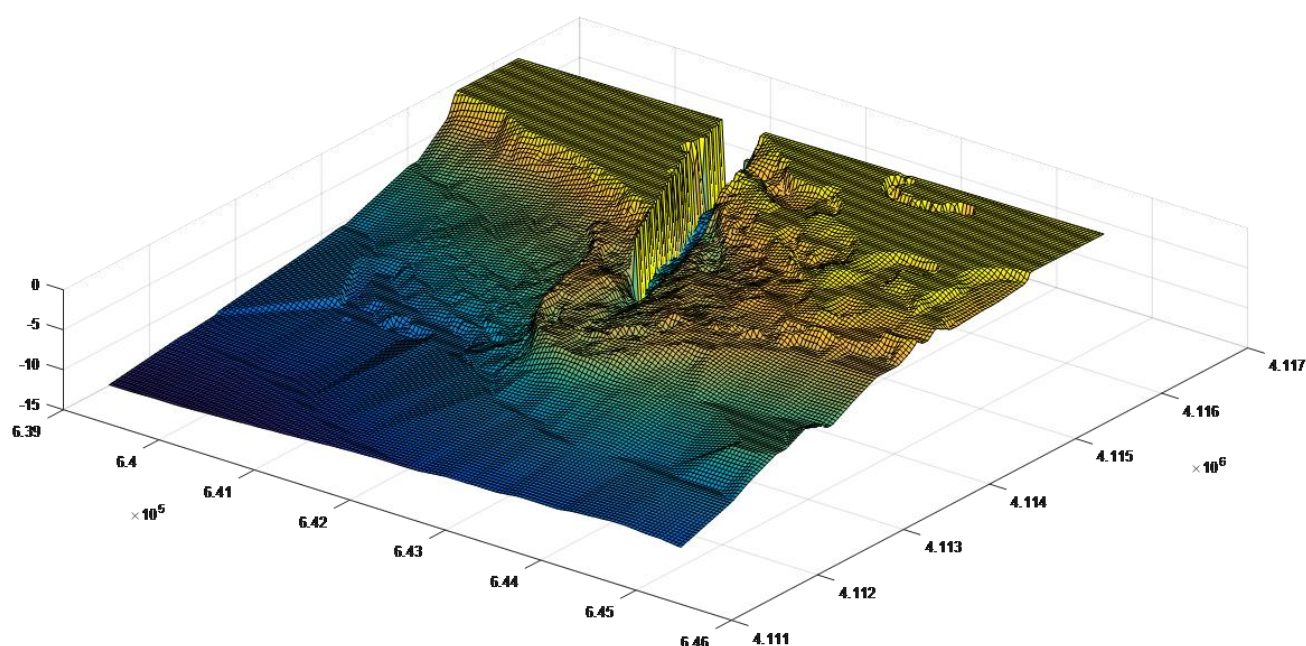
	Erosión acumulada	Sedimentación acumulada	Balance
T1	-1.664.471	1.699.251	34.780
T2	-703.780	709.566	5.787
T3	-259.244	266.712	7.468
Estado de Calma	-1.834.492	1.862.996	28.504

Tabla 4.2-18. Volumen de sedimento en m³ de erosión y sedimentación acumulada además del balance en el dominio de estudio en cada uno de los escenarios de simulación.

Por otro lado, observando la batimetría final de “T2” y “T3”, temporales cuyo volumen de transporte de sedimento y dinámica es menor respectivamente respecto a los demás, se llega a la conclusión de que la dinámica y el comportamiento de estos sigue la misma tendencia que “T1” pero con menos intensidad, por lo que se obtienen resultados con valores inferiores.

En el caso del “Estado de Calma”, se tiene una dinámica intensa siendo el escenario con un mayor volumen de transporte, el cual puede ser debido, como ya se ha mencionado en más ocasiones anteriormente, al elevado valor del “Factor de Escala”. Aun así, se observa del mismo modo que en los tres escenarios comentados, una elevada erosión y sedimentación adyacentes en la zona de la costa portuguesa. En cambio, dicha zona de erosión sigue con la misma intensidad teniendo continuidad a lo largo de toda la boca de la desembocadura como en el “T1” aunque no se observa la formación de la “Lateral Bar” con tanta intensidad como en el “T1”. Por otro lado, y no observado en el resto de los escenarios, se localiza una gran zona de sedimentación en la costa española, con otra zona de erosión adyacente.

En este caso, al igual que en los temporales anteriores, se podría determinar que el sedimento erosionado en la zona de la costa portuguesa es transportado hacia la zona donde abunda la sedimentación en la misma, formando casi en su totalidad, el volumen depositado. Por otro lado, también se podrían determinar



transportes locales aislados grafiados en la Figura 4.2-31 además, de un gran transporte hacia la costa española del sedimento erosionado en la zona adyacente a la misma.

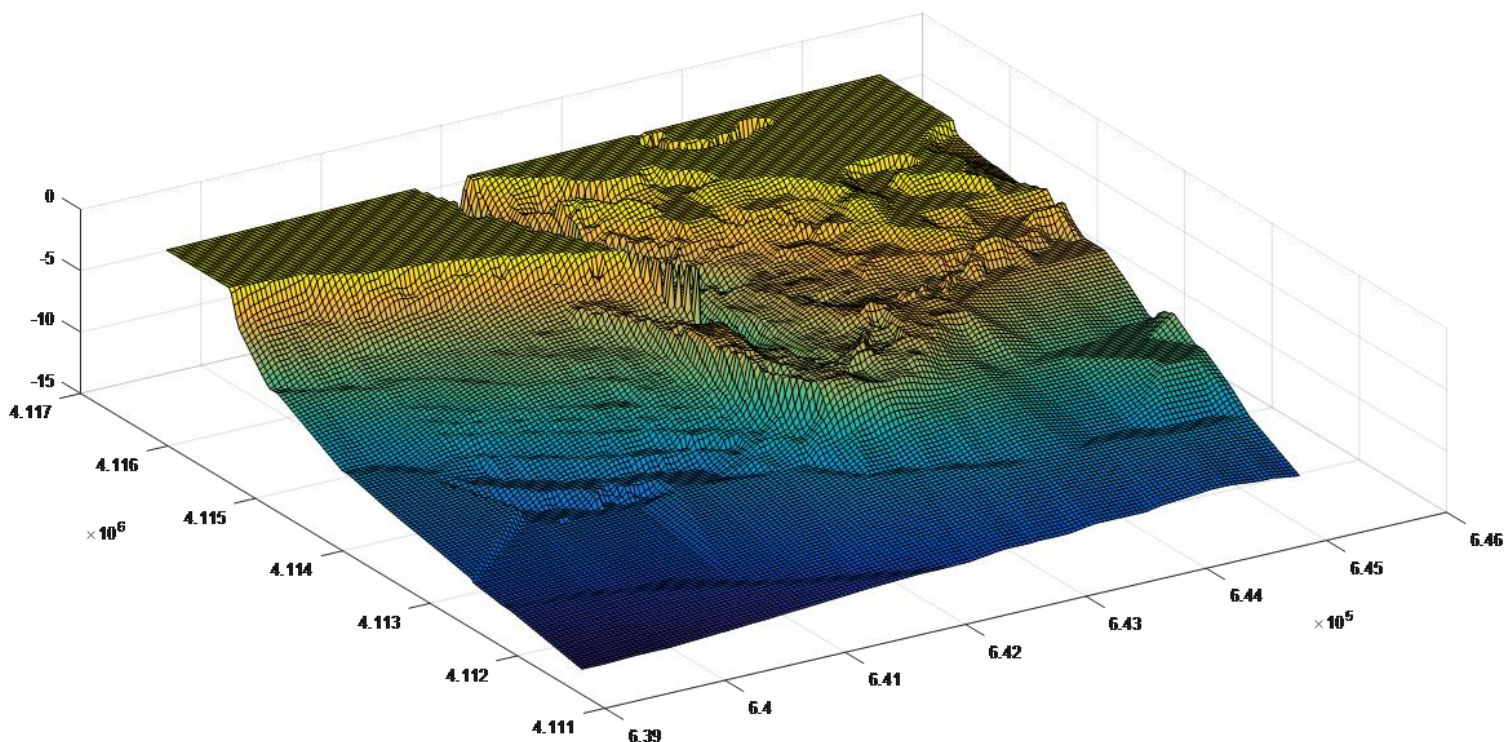
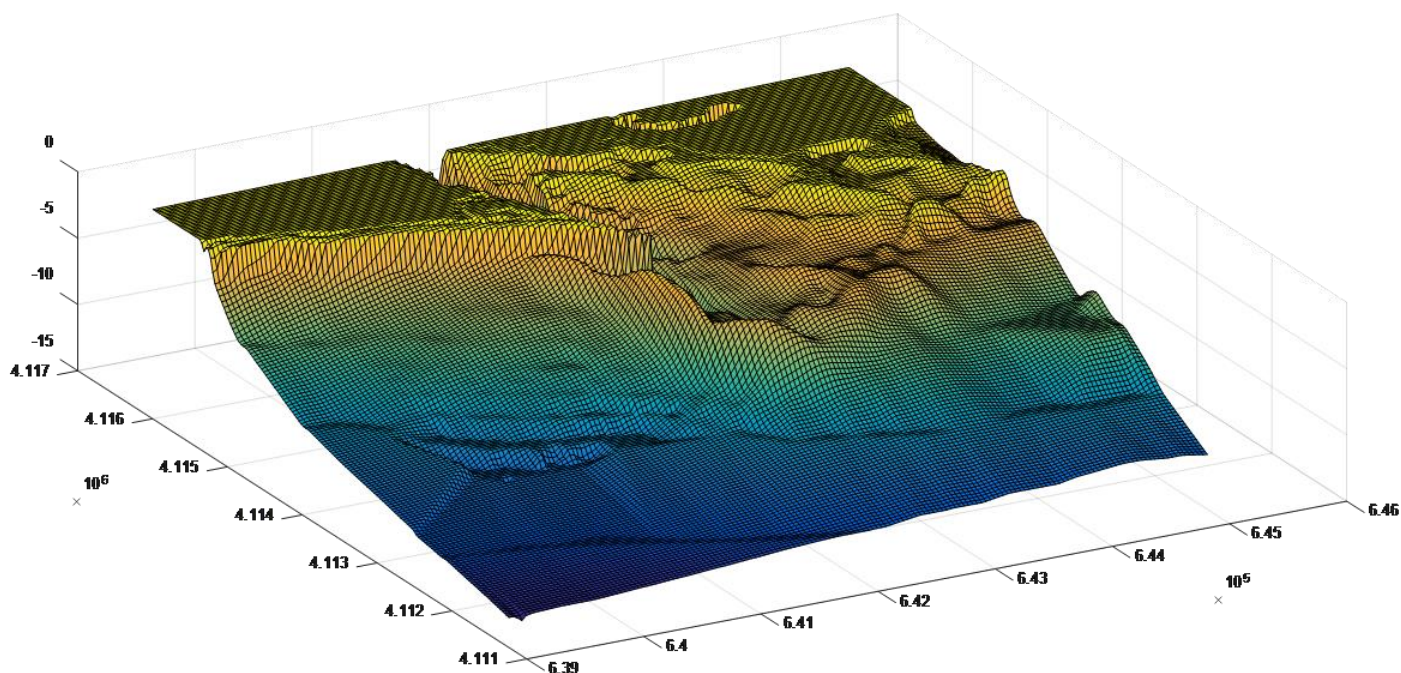


Figura 4.2-32. Representación 3D de la batimetría inicial, común a todos los escenarios de simulación.

Para finalizar, se podría tomar como conclusión, la gran influencia del oleaje en la dinámica y el transporte de los sedimentos en el dominio de estudio, observando cambios en las batimetrías finales que dependen intensamente de los parámetros tanto del oleaje como del clima marítimo de los escenarios seleccionados. Además, se localizan transportes locales de sedimentos, los cuales serán justificados y analizados con más precisión en el siguiente apartado.



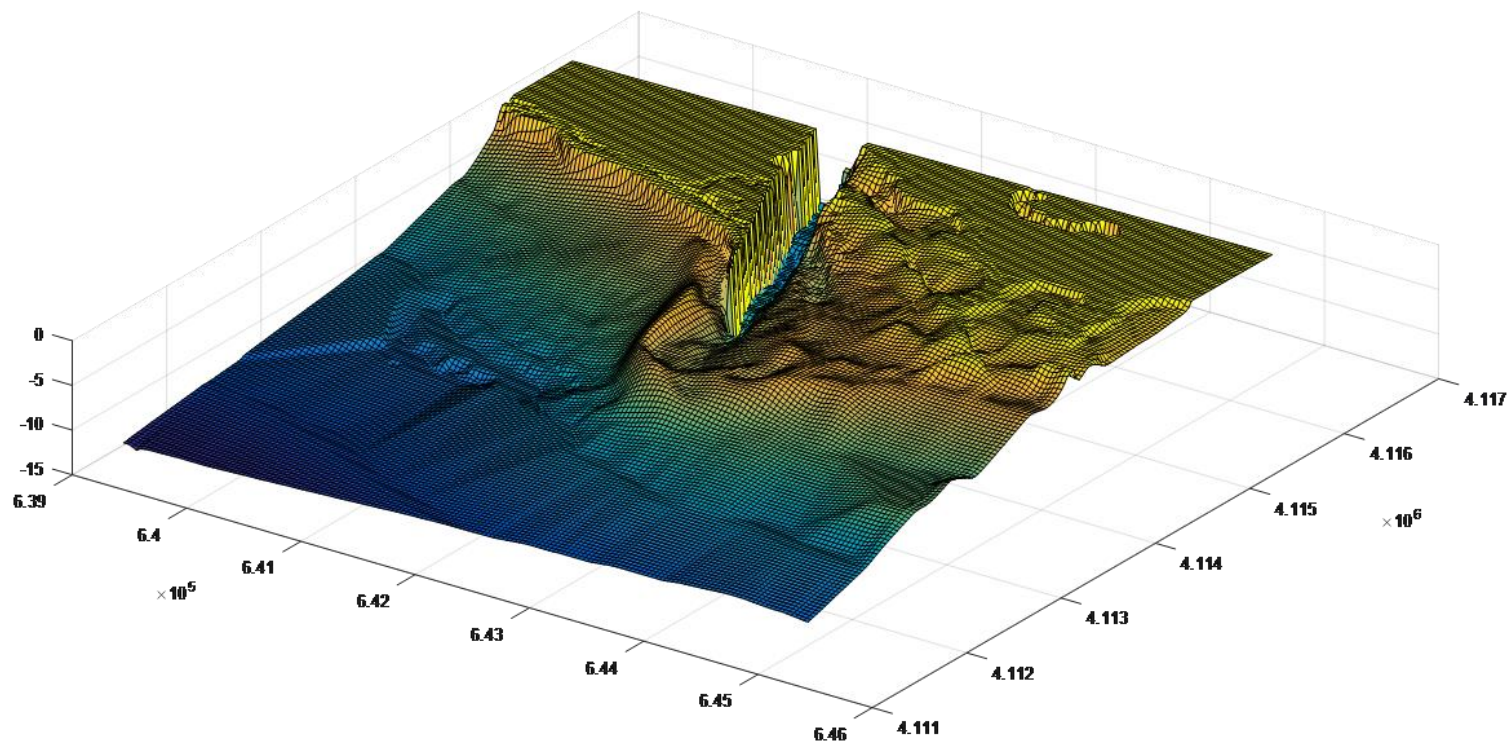
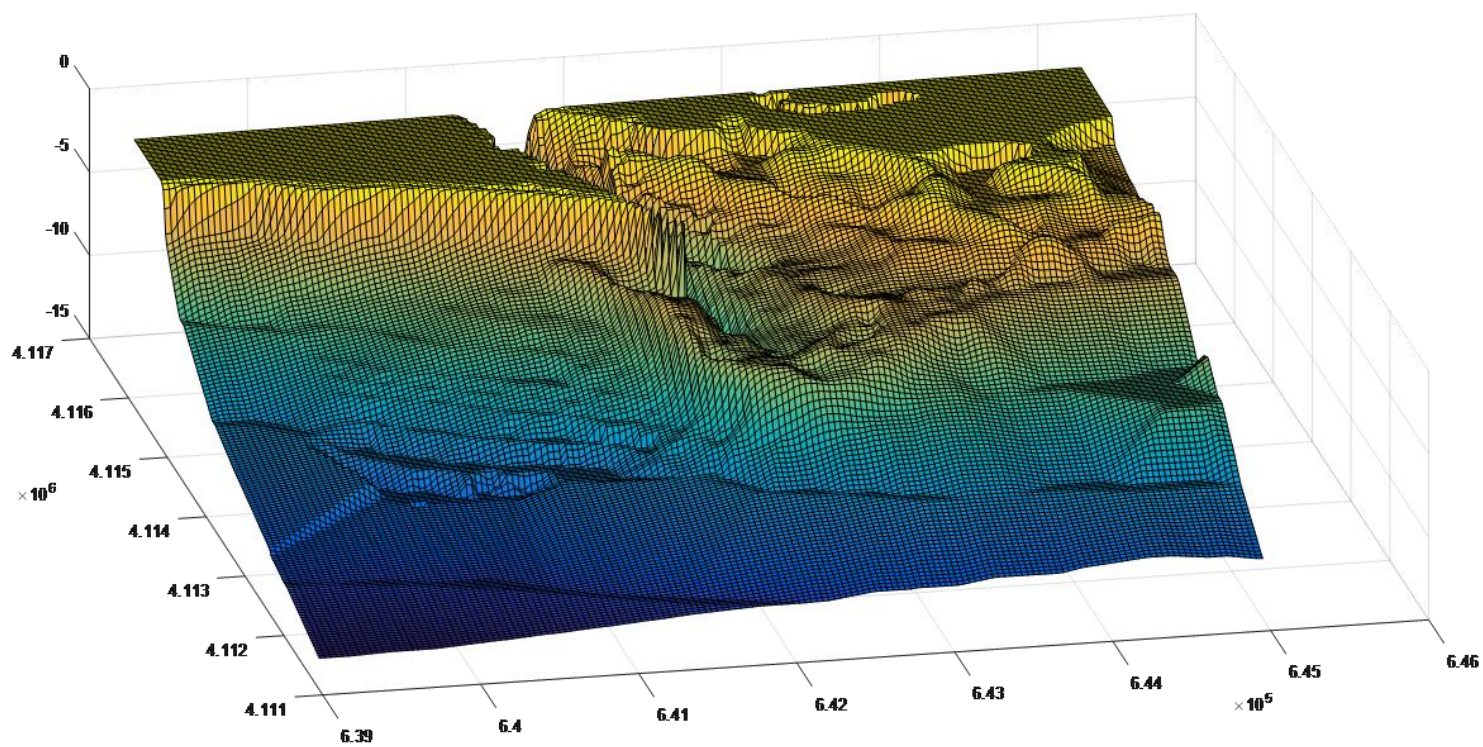


Figura 4.2-33. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en "T1".



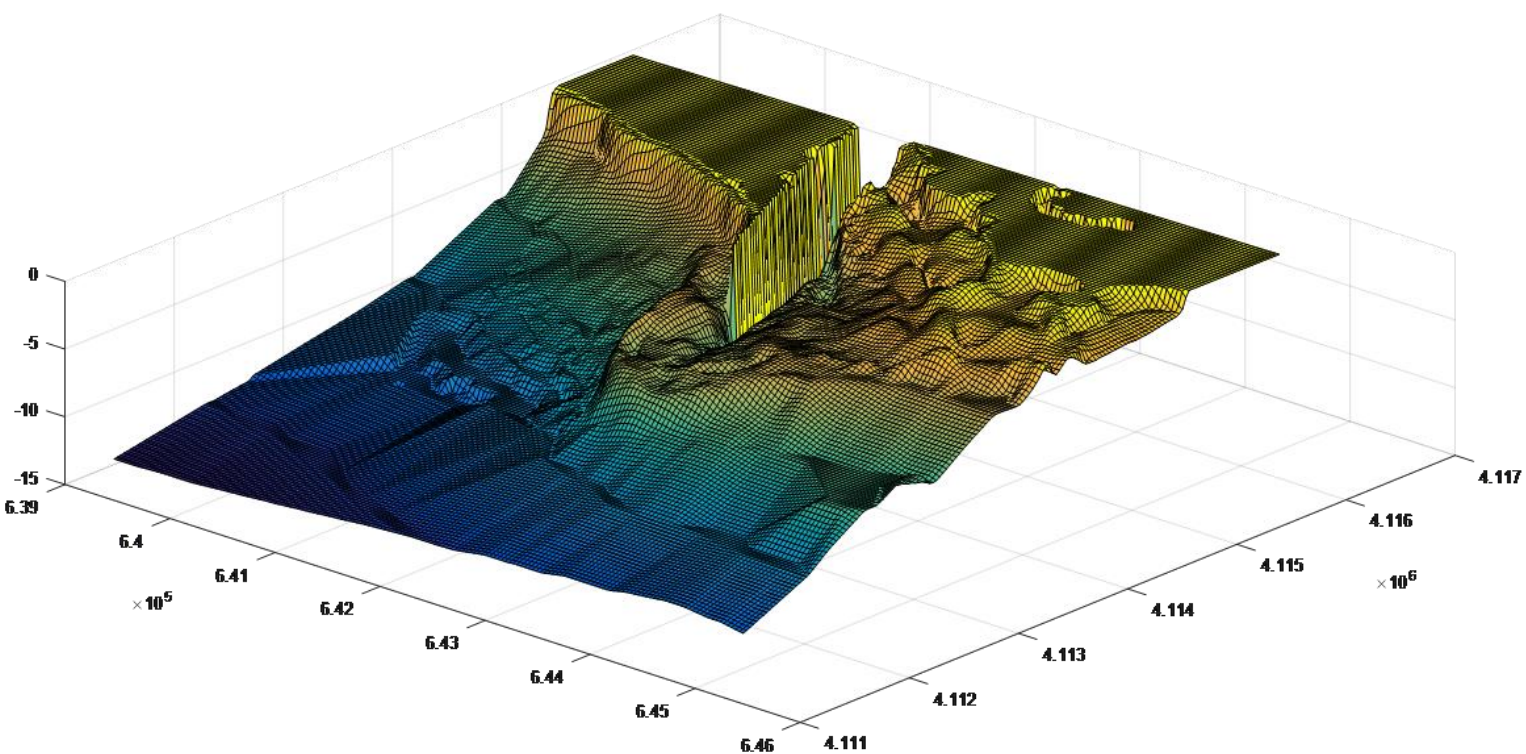
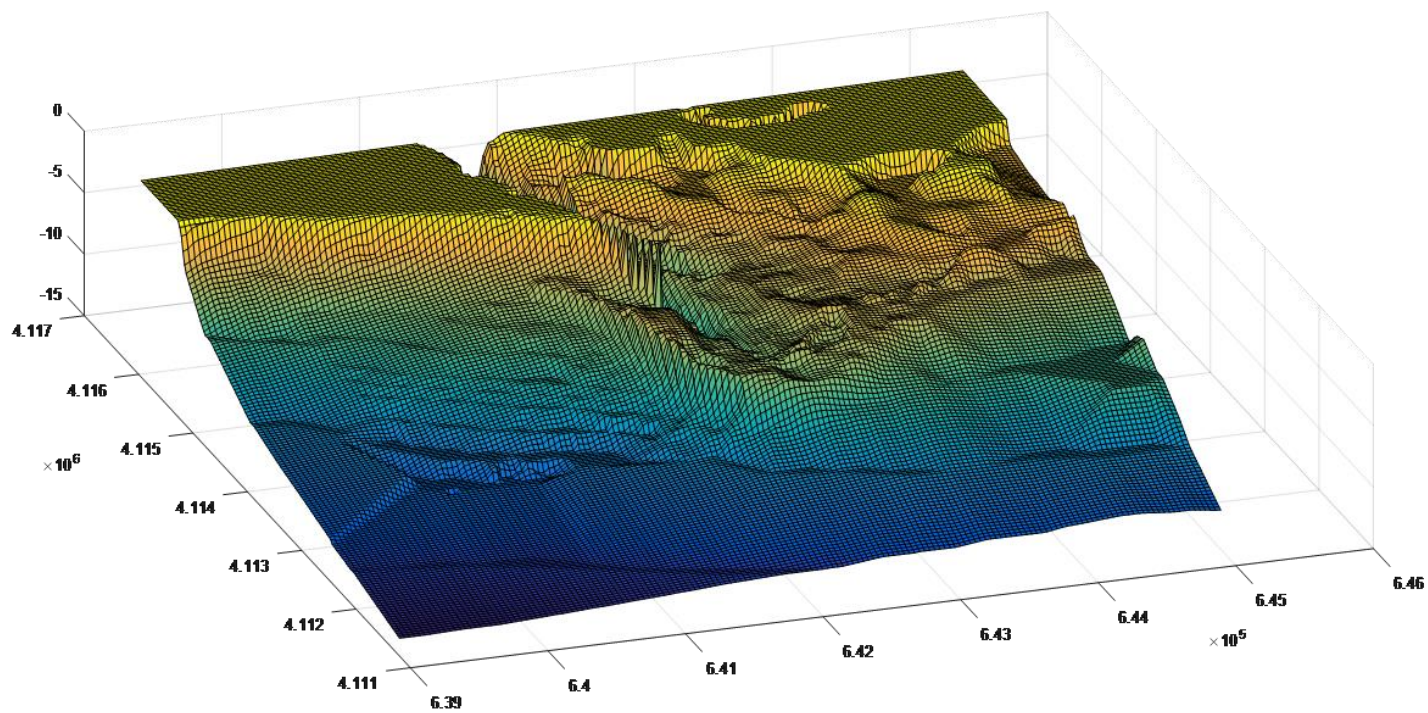


Figura 4.2-34. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en “T2”.



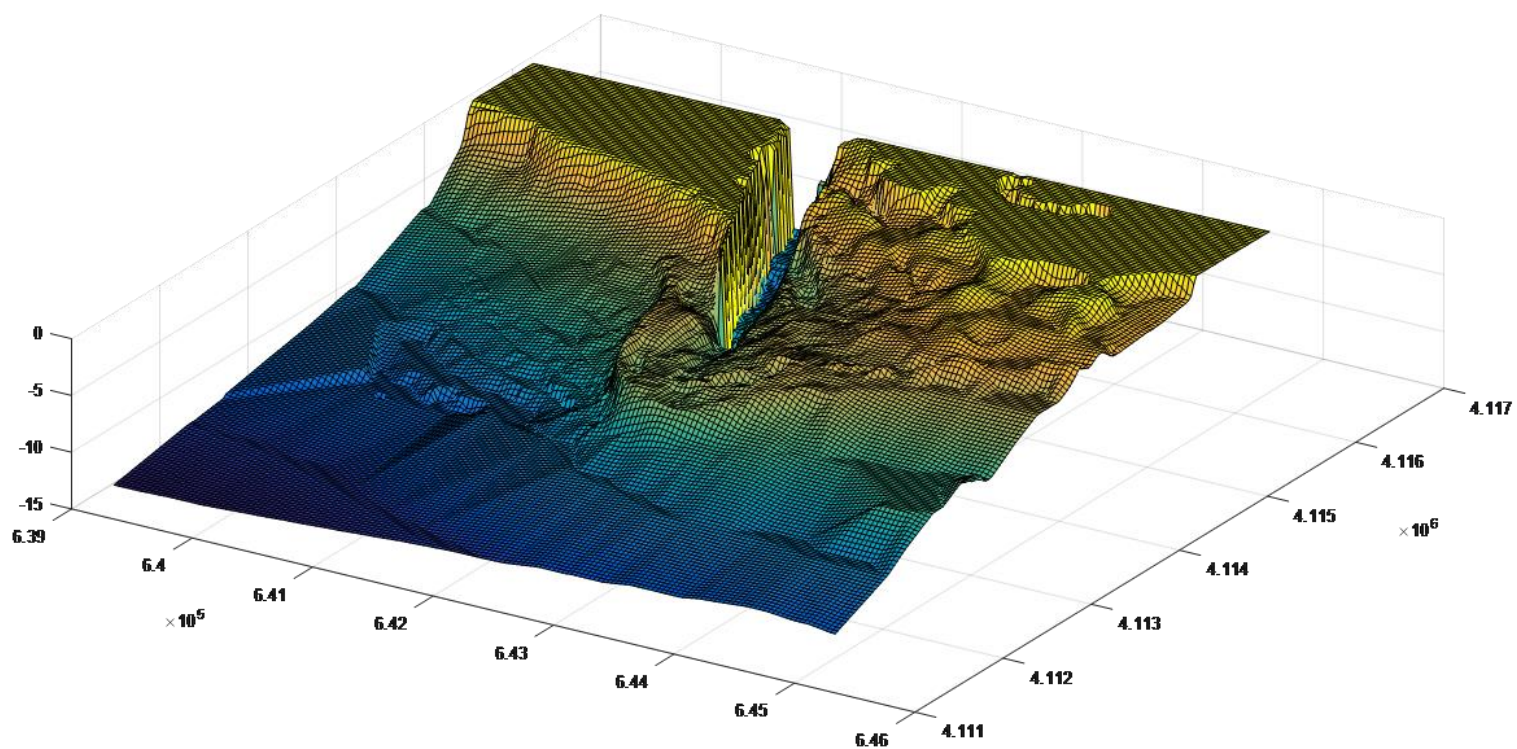
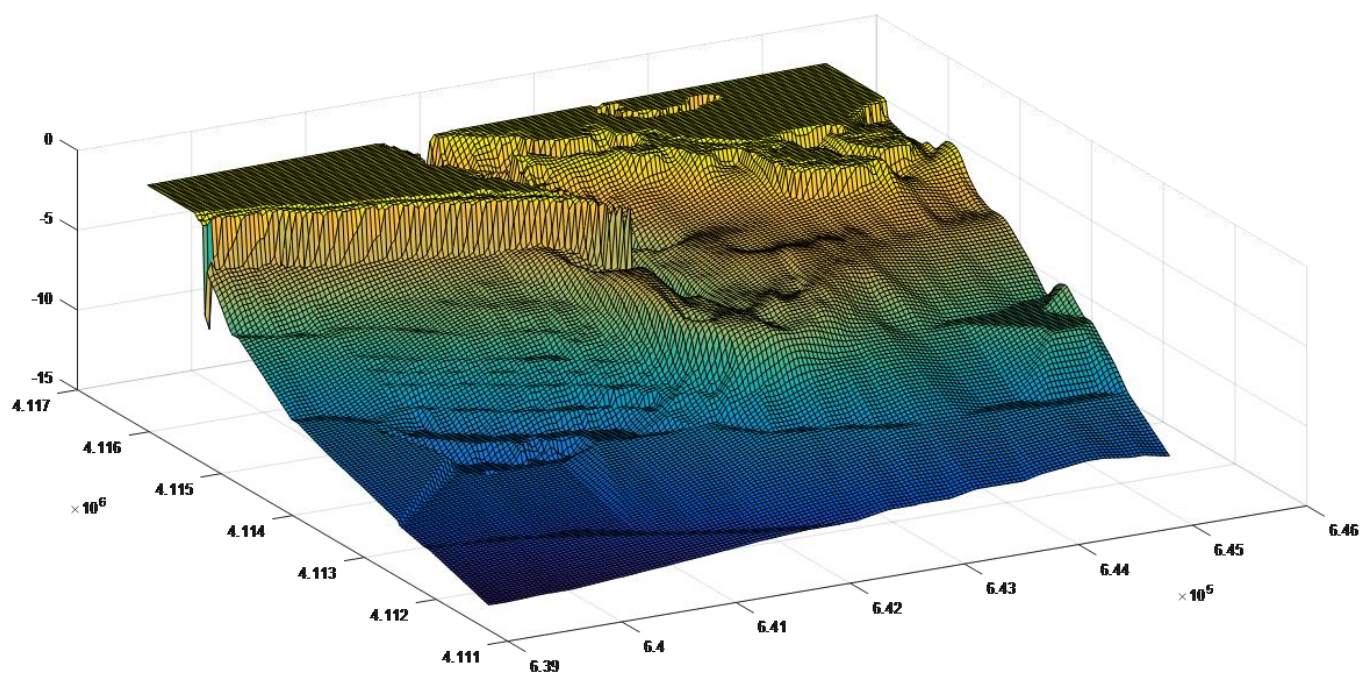


Figura 4.2-35. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en "T3".



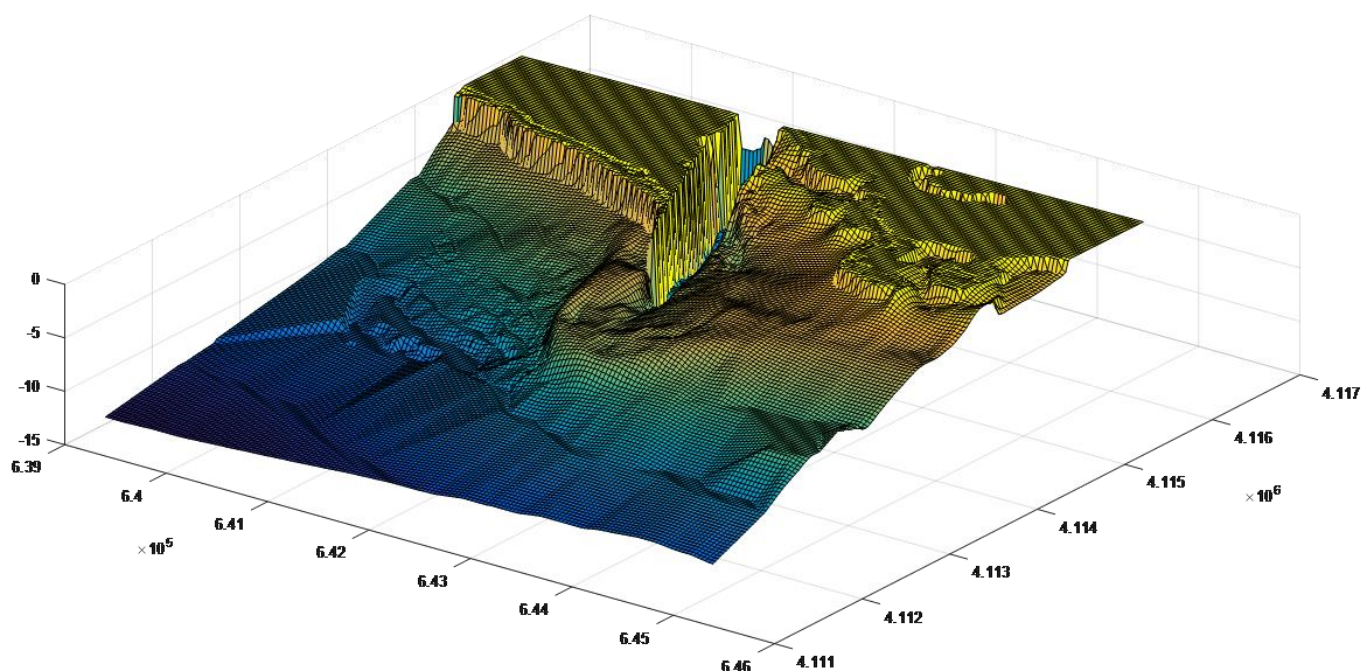


Figura 4.2-36. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en "Estado de Calma".

4.2.5.3 Influencia en "Outer Shoal", "Lateral Bar" y "Inlet Channel"

Del mismo modo que se ha desarrollado en el Apartado 4.2.4.3, para el estudio de la influencia del oleaje es necesario el análisis de los resultados proporcionados por el modelo generado en las tres zonas definidas en el Apartado 3.3.8.

Realizando el mismo tratamiento de los resultados que se ha realizado para el estudio de la influencia de la descarga del río, se puede obtener el volumen acumulado de sedimento erosionado o depositado del mismo modo que el balance final y la proporción con respecto a la totalidad de sedimento transportado en el dominio de estudio (Tabla 4.2-19).

	Erosión acumulada	Proporción respecto a la erosión acumulada total	Sedimentación acumulada	Proporción respecto a la sedimentación acumulada total	Balance
"Outer Shoal"					
T1	-204.178	12%	225.071	13%	20.893
T2	-83.848	12%	59.314	8%	-24.534
T3	-19.820	8%	8.379	3%	-11.441
Estado de Calma	-206.734	11%	53.100	3%	-153.634
"Lateral Bar"					
T1	-158.379	10%	202.718	12%	44.339
T2	-78.664	11%	53.381	8%	-25.283
T3	-21.077	8%	8.426	3%	-12.651
Estado de Calma	-192.323	10%	79.009	4%	-113.313
"Inlet Channel"					
T1	-25.009	2%	18.089	1%	-6.920
T2	-12.968	2%	10.404	1%	-2.564
T3	-2.957	1%	2.313	1%	-644
Estado de Calma	-32.135	2%	27.704	1%	-4.431
Balance Suma					
T1	-387.567	23%	445.878	26%	58.312
T2	-175.479	11%	123.098	7%	-52.381
T3	-43.854	3%	19.118	1%	-24.736
Estado de Calma	-431.191	26%	159.813	9%	-271.378

Tabla 4.2-19. Volumen de sedimento en m³ de erosión y sedimentación acumulada además del balance y de la proporción respecto al volumen obtenido en el dominio de estudio en su totalidad en "Outer Shoal", "Lateral Bar" e "Inlet Channel" en cada uno de los escenarios de simulación.

Comenzando por “T1”, como se ha mencionado ya anteriormente, se corresponde con uno de los dos escenarios de simulación con un volumen mayor de sedimentos transportados. Dicha característica, proporciona como resultado una batimetría final con grandes modificaciones siendo comparada con la inicial. En cuanto a los balances parciales en cada una de las zonas delimitadas, se tiene positivo en “Outer Shoal” y “Lateral Bar”, siendo negativa en el “Inlet Channel” aunque su balance final siga siendo positivo.

La predominancia de la erosión, lo que corresponde con un balance final negativo, en el “Inlet Channel” destaca una vez más la acción de la descarga del río, pudiéndose considerar que el aporte de sólidos que transporta y el procedente de la erosión del fondo en la boca de la desembocadura, es transportado al “Outer Shoal” y a “Lateral Bar” donde los balances finales son positivos, depositándose en zonas incluidas en las mismas. Además, se puede destacar una gran dinámica interna en estas dos últimas zonas mencionadas que se puede justificar con el movimiento hacia la boca de la desembocadura de la barra lateral ya existente y contemplada en la batimetría inicial del dominio de estudio como resultado a la acción del oleaje con grandes alturas de ola, ya que la dirección de procedencia media coincide con dicho transporte; junto con un posible e hipotético transporte de una fracción de los sedimentos acumulados en la descarga del río, resultante del aporte sólido de la misma sumado a la erosión provocado en el fondo, hacia las zonas de sedimentación ubicadas en las zonas próximas a la costa española.

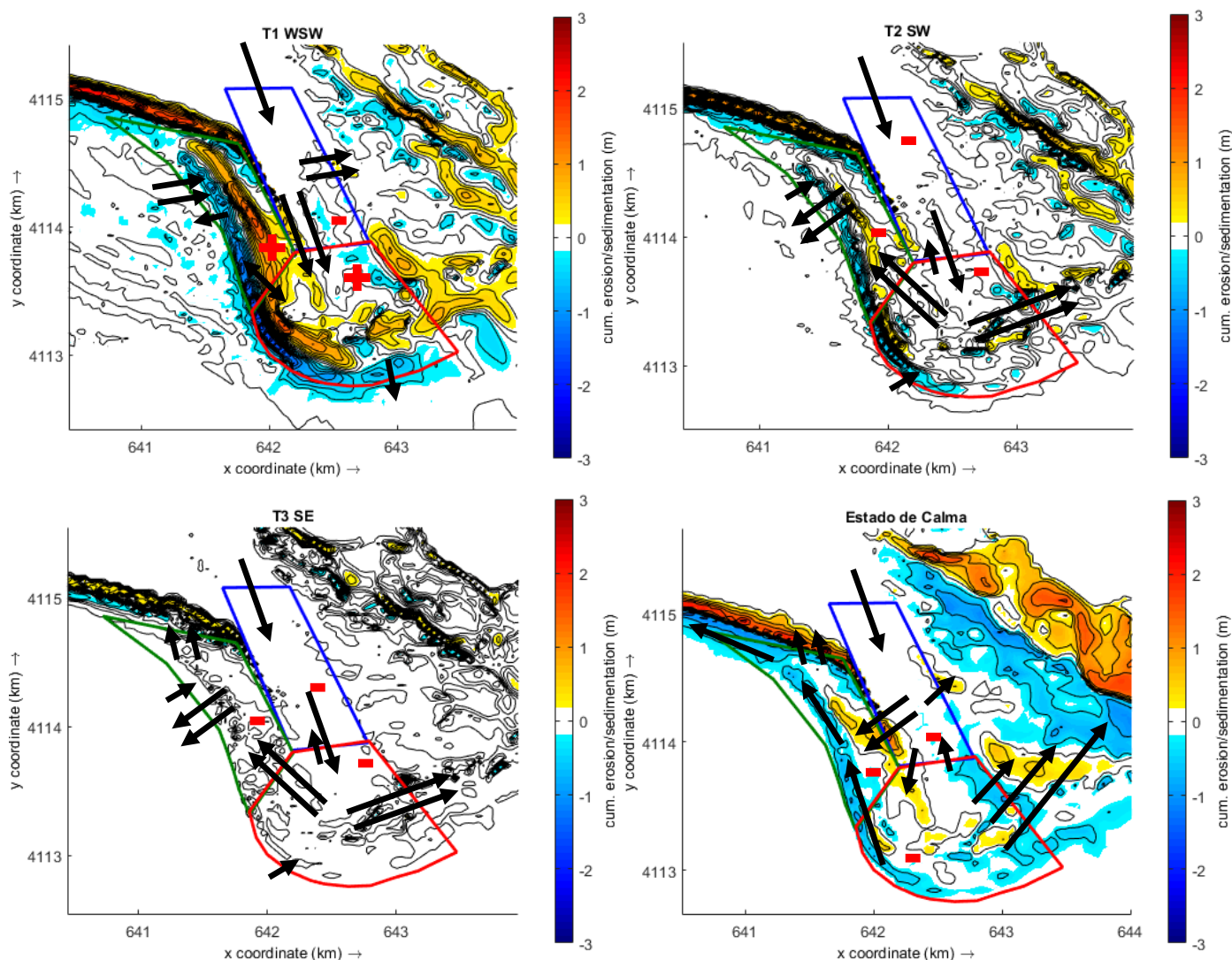


Figura 4.2-37. Representación de la erosión y sedimentación acumulada río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en cada uno de los escenarios de simulación. El transporte hipotético se encuentra representado mediante flechas con longitudes proporcionales a su magnitud además del signo del balance de cada zona descrita, significando el “signo +” una ganancia de sedimentos en la misma.

Por lo tanto, se observan que los transportes locales descritos tendrían sentido teniendo en cuenta las características del clima marítimo en dicho temporal, ya que se trata de un escenario con un oleaje con alturas

de olas elevadas y con la dirección de procedencia e incidencia que coincide con los transportes mencionados. Además, también se podría tener en cuenta como ya se desarrolló en el Apartado 4.2.5.3, la gran sedimentación en la zona de “Outer Shoal” debido a la compensación de la corriente procedente de la descarga del río y del oleaje, provocando el depósito de los sedimentos.

Por otro lado, siguiendo con “T2” y “T3”, cabe destacar la importante acción erosiva que muestran los resultados en las tres zonas, donde el balance parcial en cada una de ellas es negativo. Dicha acción erosiva es más acentuada en el “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inter Bar” respectivamente más en el primer escenario mencionado que en el segundo; por lo que se podría considerar un transporte saliente de las zonas y entre ellas, en los cuales el sedimento se ubica depositado en las zonas con sedimentación predominante del dominio de estudio, pero fuera de las mismas (Figura 4.2-37).

En el caso del “Estado de Calma”, correspondiéndose con el escenario de simulación en el que el volumen de sedimentos transportados es mayor, se tiene del mismo modo que en los dos escenarios comentados anteriormente, un balance negativo en todas las zonas, con un balance final suma de las mismas con el valor más elevado con diferencia (Tabla 4.2-19). Se observa un gran volumen de sedimento erosionado sobre todo en las zonas de “Outer Shoal” y “Lateral Bar”, cuyos valores se pueden considerar debido al transporte de dichos sedimentos a las zonas de la costa portuguesa y costa española que se encuentran fuera del ámbito de las tres zonas delimitadas y, que se caracterizan por ser entornos en los cuales se encuentra una dinámica bastante intensa con predominancia claramente sedimentaria.

Dichos transportes mencionados no pueden ser justificados teniendo en cuenta el oleaje y clima marítimo del escenario ya que se define como un estado en el cual los parámetros de oleaje y del resto de los condicionantes que caracterizan al clima marítimo de un emplazamiento, son de valores reducidos con prácticamente ningún pico ni ninguna actividad. Por lo tanto, la justificación lógica que se puede determinar en función de la conclusión que se puede establecer analizando los resultados (Tabla 4.2-19), es que en el dominio de estudio se encuentran dos zonas claramente dinámicas (zona costera portuguesa y zona costera española) y que los sedimentos procedentes de la erosión existente en las tres zonas delimitadas analizadas en este apartado junto con el aporte de sólidos que conforma la descarga, sean transportados a las mismas.

4.2.6 Simulación a largo plazo

Para la finalización del estudio de los resultados obtenidos con el modelo generado, se ha realizado el análisis de los resultados procedentes del “Escenario de Larga Duración”. Esta simulación, como se ya ha mencionado anteriormente, abarca un poco más del primer semestre del año de la batimetría utilizada como base en el modelo, además de abarcar al temporal “T3”.

El estudio y análisis de los resultados de este escenario seleccionado se considera de gran relevancia ya que, posibilita el conocimiento de la dinámica y el comportamiento más real del modelo ante la acción de, entre otros, el viento y el oleaje, con parámetros más variados y aleatorios en un periodo de tiempo más extendido.

Dicho análisis se va a dividir en los mismos bloques que los apartados anteriores. Se va a comenzar con la influencia de los resultados obtenidos en la vía de navegación, seguido de un estudio más global en el dominio de estudio para finalizar con el análisis más preciso en las zonas aisladas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel”.

4.2.6.1 Influencia en vía de navegación

El análisis de los resultados de esta simulación en la vía de navegación se va a llegar a cabo, al igual que en las ocasiones anteriores, mediante la comparación de los valores interpolados de la batimetría al final de cada uno de los escenarios de simulación (Figura 4.2-38).

Se observa una batimetría final más suavizada que en los casos anteriores donde se puede destacar una gran sedimentación acumulada en la zona comprendida entre los 40 y 100 metros del canal, a partir de la cual domina la acción erosiva hasta el final de dicho canal. Por lo tanto, se podría determinar el traslado del bajo acentuado encontrado en la batimetría inicial entre los 90 y 100 metros longitudinales a través del transporte del sedimento erosionado entre los 100 metros y el final de dicho canal con la formación de un gran depósito de menor calado en la zona central del mismo.

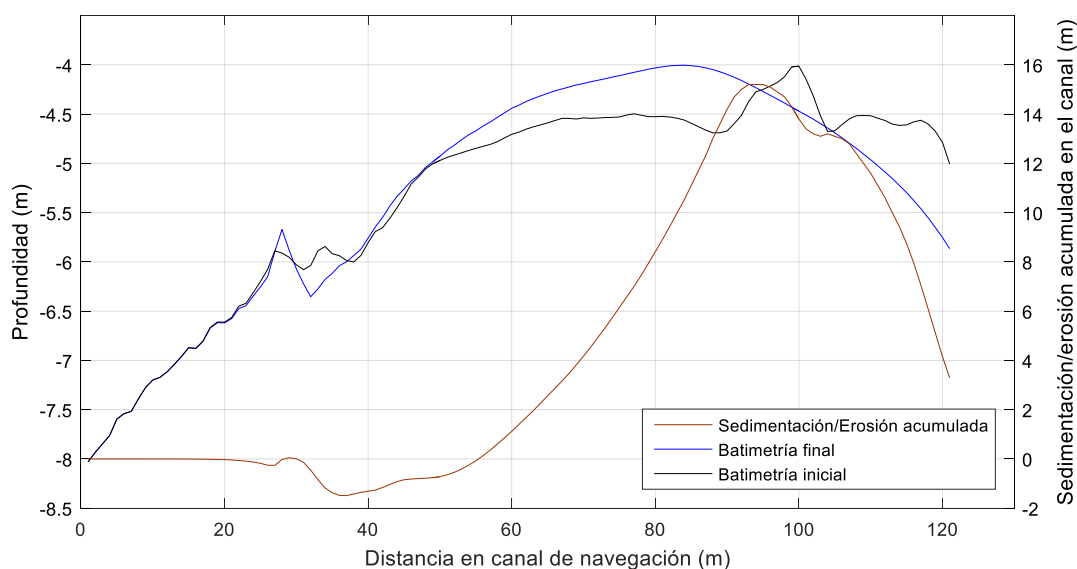


Figura 4.2-38. Erosión o sedimentación acumulada a lo largo del canal de navegación en forma de comparación de las batimetría inicial y final en el “eje y” izquierdo, junto con Erosión o sedimentación acumulada a lo largo del canal de navegación en el “eje y” derecho.

Por otro lado, llevando a cabo la representación de la erosión o sedimentación acumulada a lo largo del canal de navegación en altura, se llega a la conclusión de la existencia de una sedimentación dominante a lo largo de casi todo el recorrido de canal definido; elevando notoriamente su valor cuando comienza la zona central con menor calado en la batimetría final hasta la ubicación donde se comienza la erosión del tramo final.

Aunque en apartados posteriores se realicen balances más reales, en este caso para un análisis cualitativo que posibilite la proposición de conclusiones coherentes, se tomar la hipótesis inicial de la existencia de una compensación entre la sedimentación y la erosión del mismo canal. Es decir, se considera un transporte longitudinal del sedimento a lo largo del canal de navegación donde las zonas sedimentadas son rellenadas con el sedimento excedente de las zonas erosionadas. Por lo tanto, observándose un valor positivo final en altura de sedimentación o erosión acumulada a lo largo del canal, lo que significa una sedimentación dominante frente a la erosión y una necesidad de sedimento, se podría llegar a la conclusión de un aporte de sedimentos en el canal procedentes de otras partes del dominio o incluso del aporte de sólidos procedentes de la descarga del río.

4.2.6.2 Influencia en el dominio de estudio

Al igual que en el canal de navegación, los resultados obtenidos del escenario simulación de “Larga Duración” muestran una dinámica intensa en el dominio de estudio con grandes cambios en la batimetría del dominio de estudio (Figura 4.2-39).

Observando la Figura 4.2-40, se puede determinar que los resultados obtenidos tras la simulación de este escenario siguen la misma tendencia a los obtenidos en los temporales y el “Estado de Calma” ya mencionados anteriormente.

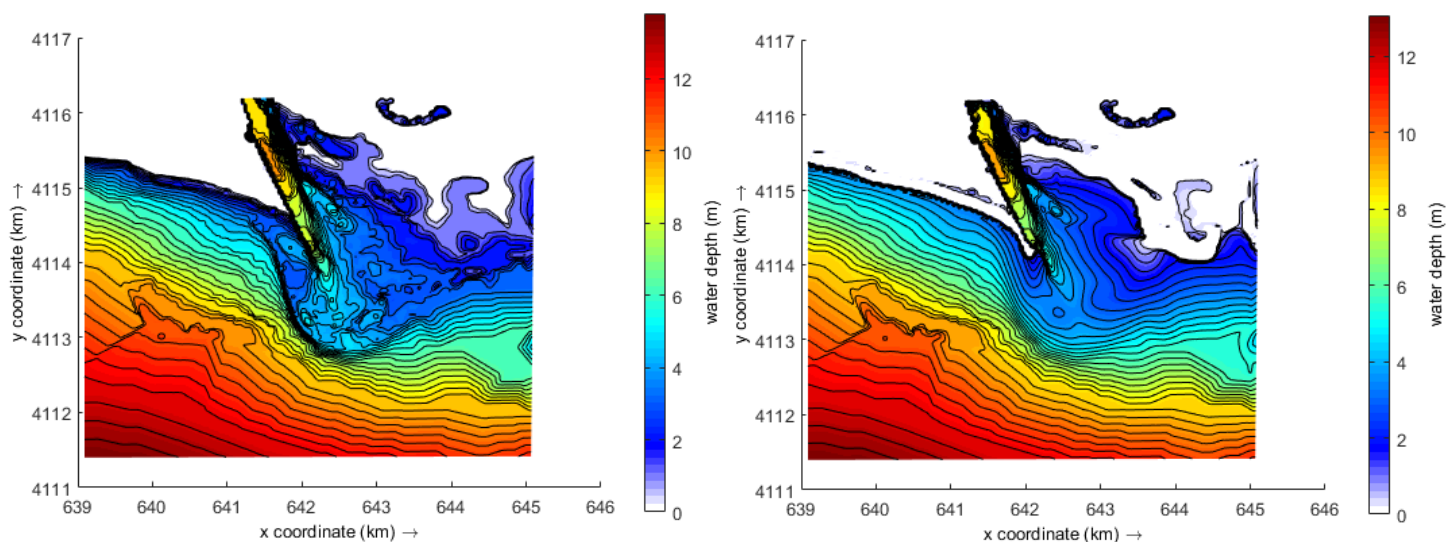


Figura 4.2-39. Batimetría inicial y final del escenario “Larga Duración” en el dominio de estudio. Izquierda y derecha respectivamente.

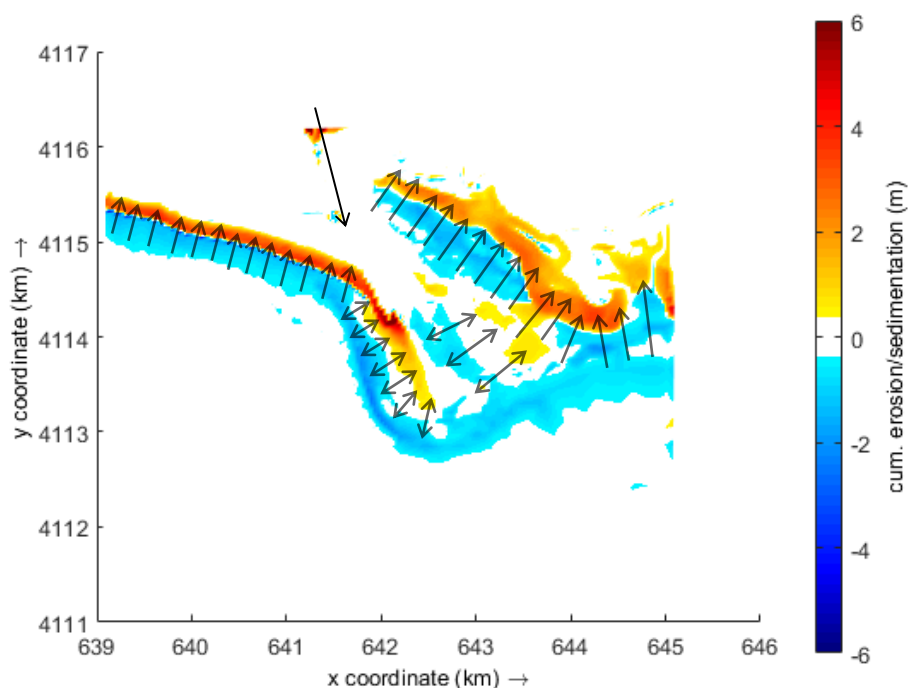


Figura 4.2-40. Erosión y sedimentación acumulada en el dominio de estudio en escenario “Larga Duración”.

Se puede comenzar destacando una vez más, el gran transporte de sedimentos como consecuencia de la hidrodinámica intensa en la zona de la costa portuguesa, en la cual, se encuentra la zona de rebajamiento seguida de la zona de relleno. Por otro lado, cabe mencionar una gran zona de sedimentación que coincide con la entrada del canal de navegación en la boca de la desembocadura del río Guadiana, zona en la cual, la acumulación de sedimentos podría provocar dificultades en la navegabilidad del tráfico marítimo en forma de pérdida de calado. Para finalizar, se puede observar una zona amplia de grandes depósitos en la zona de la costa española, la cual se encuentra adyacente con un entorno de rebajamiento del fondo. También cabe mencionar estos resultados hay que tomarlos con precaución dados los cambios tan profundos en la batimetría que se obtienen, ya que los valores observados máximos de 6 m se consideran excesivos. Por lo tanto, se necesitarían varias batimetrías adicionales para la comprobación y validación del modelo.

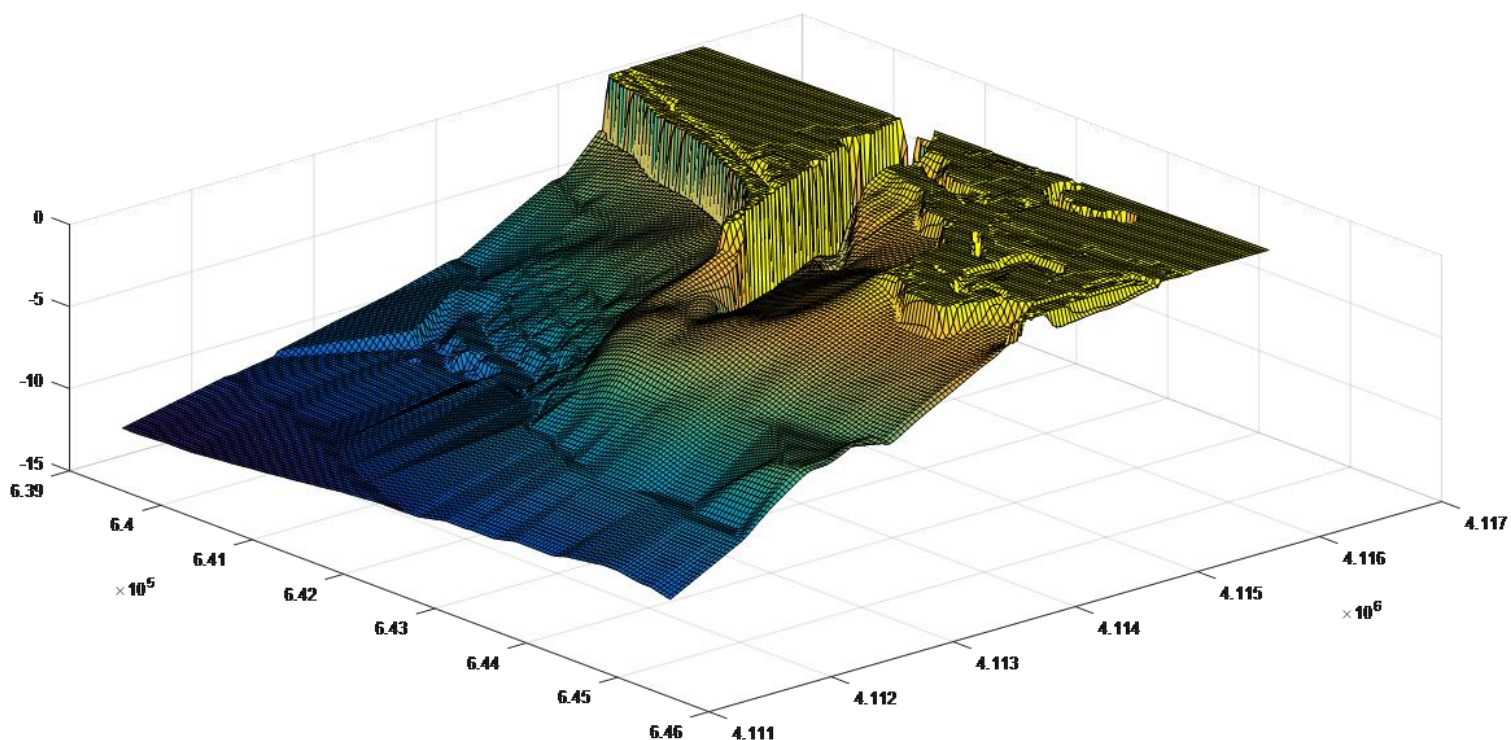
Erosión acumulada	Sedimentación acumulada	Balance
- 4.448.316	4.491.895	43.579

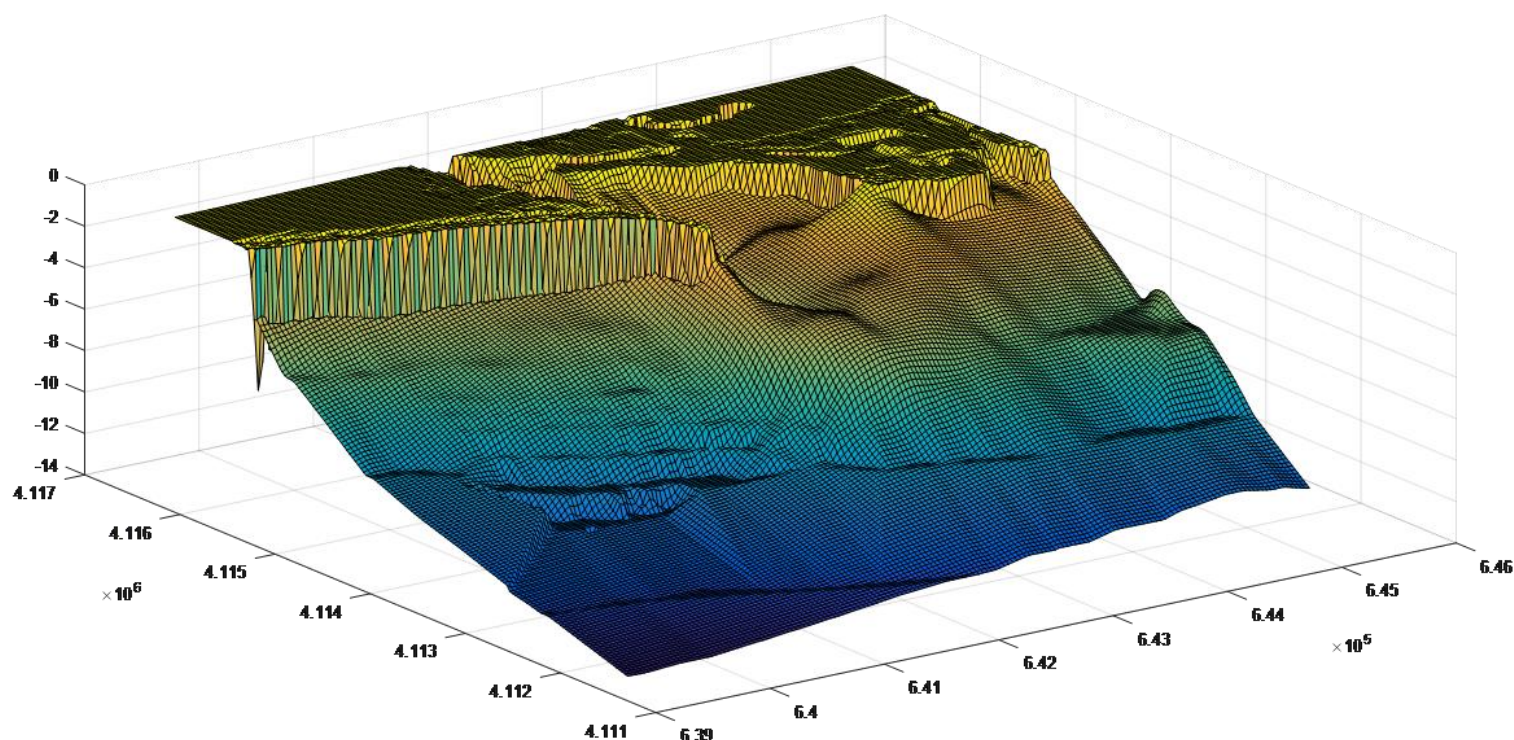
Tabla 4.2-20. Volumen de sedimento en m³ de erosión y sedimentación acumulada además del balance en el escenario de simulación “Larga Duración” en el dominio de estudio.

En cuanto al transporte local de sedimentos y teniendo en cuenta la hipótesis inicial, al igual que en el caso del análisis de los demás escenarios de simulación, de la existencia de una compensación de la sedimentación con la erosión en el dominio de estudio se podría llegar a la conclusión de que este escenario se corresponde con la simulación en los que los resultados muestran un comportamiento dinámico más fuerte, con valores más elevados tanto en erosión como en sedimentación (Tabla 4.2-20). Además, se podrían determinar las dinámicas locales en forma de transporte de sedimentos en las zonas de la costa portuguesa y española, donde el sedimento depositado en las mismas líneas de costa se podría corresponder con el sedimento procedente del fondo erosionado de la zona adyacente, además de la zona de la boca de la desembocadura, cuya zona de acumulación de sedimentos puede ser procedente de los incluidos en el aporte sólido en la descarga del río junto con transporte local de las zonas adyacente entre las franjas erosionadas de las costas que rodean a dicha desembocadura.

Por otro lado, como se muestra en la Tabla 4.2-20, la suma del volumen del sedimento erosionado en todo el dominio de estudio no sería suficiente para compensar la deposición de sedimentos que caracteriza los resultados de esta simulación, por lo que el valor resultante tras realizar el hipotético balance es de signo positivo. Esta falta de sedimentos podría ser justificada con los sedimentos procedentes del aporte sólido que incluye la modelización de la descarga del río Guadiana en su desembocadura.

De todos modos, en el siguiente apartado, por medio del análisis más preciso de las zonas “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” se podrá determinar de forma más eficaz el comportamiento del modelo ante este escenario de simulación y, sobre todo, la identificación de los transportes locales en función de los balances aislados de sedimentación y erosión en cada una de las zonas.





4.2-41. Representación 3D de la batimetría final en el dominio de estudio en simulación “Larga Duración”.

4.2.6.3 Influencia en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” y “Inlet Channel”

Realizando el mismo tratamiento de los resultados que se ha realizado para el estudio de la influencia del oleaje y de la descarga del río, se puede obtener el volumen acumulado de sedimento erosionado o depositado del mismo modo que el balance final y la proporción con respecto a la totalidad de sedimento transportado en el dominio de estudio (Tabla 4.2-21).

	Erosión acumulada	Proporción respecto a la erosión acumulada total	Sedimentación acumulada	Proporción respecto a la sedimentación acumulada total	Diferencia
“Outer Shoal”	-606.681	14%	116.597	3%	-490.084
“Lateral Bar”	-522.073	12%	342.821	8%	-179.252
“Inlet Channel”	-97.117	2%	197.298	4%	100.181
Balance suma	-1.225.870	28%	656.716	15%	-569.155

Tabla 4.2-21. Volumen de sedimento en m³ de erosión y sedimentación acumulada además del balance y de la proporción respecto al volumen obtenido en el dominio de estudio en su totalidad en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en escenario de simulación “Larga Duración”.

En cuanto al valor de estos resultados, se vuelve a determinar la intensa hidrodinámica y el elevado volumen de transporte de sedimentos en este escenario de simulación. Comenzando por el “Outer Shoal”, se puede destacar un gran volumen de sedimento erosionado frente a aproximadamente una sexta parte de relleno, por lo que se estima que, en dicha zona mencionada, se produce un transporte de su gran sedimento erosionado hacia las zonas adyacentes como puede ser la gran zona con sedimentación dominante en la costa portuguesa que se prolonga hasta el dique, o incluso, la costa española.

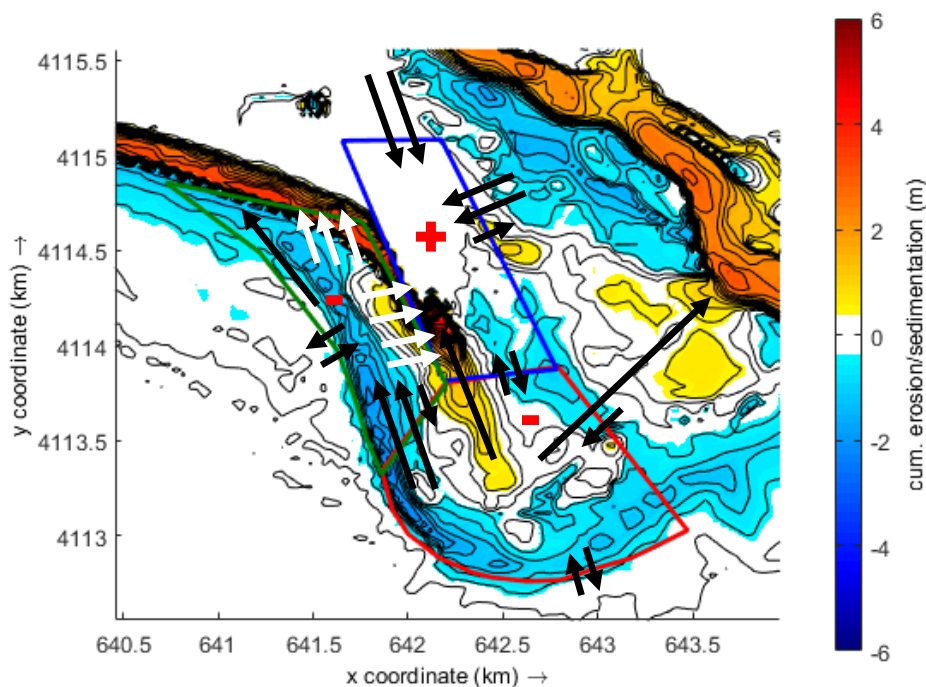


Figura 4.2-42. Representación de la erosión y sedimentación acumulada río en “Outer Shoal”, “Lateral Bar” e “Inlet Channel” en el “Escenario de Larga Duración”. El transporte hipotético se encuentra representado mediante flechas con longitudes proporcionales a su magnitud además del signo del balance de cada zona descrita, significando el “signo +” una ganancia de sedimentos en la misma.

Por otro lado, realizando un análisis de los resultados obtenidos en cuanto a la zona “Lateral Bar”, se observa una erosión acumulada elevada, pero de valor un poco inferior a la de la zona “Outer Shoal”; en cambio, se concluye con una sedimentación de valor elevado a la anterior mencionada. Dicho aspecto se debe a que dicha zona incluye a una parte de la zona donde abunda la sedimentación de la costa portuguesa, aun así, el balance sigue resultando favorable hacia la erosión, por lo que del mismo modo que en la zona del “Outer Shoal”, se produce un transporte neto de sedimentos hacia fuera de dicha zona. Este transporte se considera, teniendo en cuenta la hipótesis de que el transporte de sedimentos desde zonas erosionadas hasta zonas de relleno es más probable cuanto menos sea la distancia que recorrer por el mismo, que en casi su totalidad se lleva a cabo hacia la costa portuguesa pudiendo darse, pero en menor proporción, hacia la zona de depósitos de la boca de la desembocadura.

En cuanto a la tercera zona delimitada, “Inlet Channel”, se corresponde con la única zona en la cual la sedimentación domina frente a la erosión. Dicho cambio de signo con respecto a las dos zonas restantes podría justificarse con la deposición de los sedimentos procedentes del aporte sólido que incluye la descarga del río en el modelo debido a la composición de la corriente de esta con la acción del oleaje, ya que, en el caso de esta simulación, la descarga es de menor caudal que los temporales analizados y desarrollados en apartados anteriores. De todos modos, por otro lado, también se podría determinar al transporte desde la zona “Outer Shoal” el entorno del dique comprendida en esta zona en la cual, se halla la zona con sedimentación pronunciada en la boca de la desembocadura además de mencionar, aunque se considere de menor probabilidad y de menor volumen, un transporte desde la zona se erosiones acumuladas más cercanas a la costa española.

Para finalizar, y realizando un análisis del balance suma de la erosión y sedimentación acumulada en las tres zonas, se llega a la conclusión de que su proporción con respecto al total no es grande debido a que la gran mayoría del entorno con grandes sedimentaciones y erosiones ubicadas en las costas de los dos países no se encuentran incluidas en ninguna de las tres zonas mencionadas anteriormente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Máster se ha centrado en la caracterización hidrodinámica del sistema estuarino y el delta sumergido que conforma la desembocadura del río Guadiana frente al análisis de los resultados obtenidos mediante un modelo numérico del mismo ante una serie de combinaciones de clima. El modelo hidrodinámico que se ha implementado y validado ha sido Delft3D (módulos WAVE y FLOW). Las principales conclusiones son:

- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es WSW, con alturas de olas entre 0 y 6 m y periodos pico entre 2 y 21 s, siendo más frecuentes las alturas de ola inferiores a 1m y los periodos pico entre 4 y 6 s. Las direcciones de procedencia del viento más frecuentes son NNW y SW, con rango de velocidades de viento entre 0 y 21 m/s y más frecuentes entre 2 y 6 m/s.
- El sistema es mesomareal y semidiurno, con una carrera media de 2 m, oscilando entre 4 m durante las mareas máximas y 1 m durante las mareas mínimas. La marea tiene influencia en toda la zona de estudio, inundando una amplia zona de marismas y avance de la línea de costa sobre todo en el margen de la costa española.
- En situaciones de bajamar, sobre todo en las máximas, la profundidad en el canal de navegación se considera insuficiente para el cumplimiento de las condiciones mínimas de navegabilidad. Esta problemática se incrementa ante la acción del oleaje con dirección de procedencia WSW o SW, las cuales son las de mayor probabilidad de ocurrencia en el dominio de estudio llegándose a alcanzar calados de valores inferiores a 2.5 m. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que la dinámica de la zona de estudio resulta con un comportamiento del modelo numérico en el cual, se observan resultados que tienden a la reducción del calado en la zona más cercana del canal de navegación a la bocana de la desembocadura, considerándose con la zona más crítica y de mayor interés en el estudio del mismo.
- Se ha analizado cómo en condiciones de mareas máximas y tormentas, las velocidades en el canal de navegación de acceso de la desembocadura son elevadas de valores que alcanzan los 2 m/s en los momentos de “vaciante” donde se hace más notoria la presencia de la descarga del río. Sin embargo, se ha llegado a la conclusión, de que en esta zona dominan las condiciones medias de viento y oleaje que tienden a cerrar la desembocadura. Esto supone que a pesar de los valores altos de velocidades en condiciones de marea no existe un equilibrio en el canal de navegación y es necesario un dragado periódico.
- La existencia del aporte de sólido en la descarga del río no provoca grandes desviaciones en variaciones de batimetría en el canal de navegación, por lo que se concluye que, apreciando las condiciones de navegabilidad del canal definido, no es un factor relevante.
- La descarga del río junto con la concentración de sólidos que transporta provoca un aumento considerable del volumen de sedimentos depositados y erosionados en el dominio de estudio; por

lo que se podría tomar como conclusión que la existencia de la modelización de la descarga del río, y, sobre todo, el hecho de incluir el aporte de sólidos en dicha descarga en el modelo provoca un aumento del transporte de material, y, por lo tanto, una dinámica un poco más intensa. Además, cabría destacar un gran aumento de la sedimentación en combinaciones de clima en régimen medio o en condiciones de calma sobre todo influenciada por la existencia del aporte sólido en la descarga.

- La descarga del río en las condiciones de tormenta más probables se comporta como una fuente de material que se deposita en las zonas del “Outer Shoal” y “Lateral Bar”, como consecuencia de la compensación de las corrientes procedentes y, por lo tanto, la disminución de la velocidad, de la descarga, con las procedentes del oleaje con dirección de procedencia WSW y SW. En cambio, en combinaciones de clima de régimen medio o condiciones de calma, dicho depósito se produce en la zona interna de la bocana de la desembocadura, “Inlet Channel”, como consecuencia de un valor de descarga del río de menos intensidad. Por lo tanto, la descarga del río participa activamente en la tendencia a cerrar la desembocadura sobre todo debido a la existencia del aporte de sólidos. Este hecho se aprecia en la zona que rodea al canal de navegación por lo que, aunque no provoque cambios relevantes en la batimetría del mismo, sí lo hace en las zonas colindantes en los combinaciones de clima que más probabilidad de ocurrencia tienen en el dominio de estudio.
- Como solución a la problemática determinada por la existencia de la descarga del río de una concentración de sólidos elevada, se propone la regulación y el control del mismo mediante la construcción de elementos, como por ejemplo aliviaderos que provoquen la sedimentación de los mismos en el curso bajo del río Guadiana.
- La acción de fuertes condiciones de oleaje provoca el transporte del “Outer Shoal” ya existente en la batimetría inicial del año 2016, hacia la bocana de la desembocadura través de zonas erosionadas y de relleno mediante un perfil más suavizado, pero tendiendo a la disminución progresiva del calado y por lo tanto a ser obstaculizada. Esta problemática está relacionada con la conclusión ya expuesta anteriormente, en la que las corrientes procedentes de la descarga del río con su aporte de sólido, se compensa con la corriente del oleaje predominante de alta intensidad, provocando la sedimentación y erosión de la zona del “Outer Shoal”. Esta problemática es observada sobre todo en combinaciones de clima con condiciones extremas en las direcciones más predominantes del oleaje, donde la dirección traslado del “Outer Shoal” depende directamente de cuál de las dos corrientes accionantes predomina sobre la otra. En este caso, la acción del oleaje predomina sobre la ya mencionada anteriormente, por lo que el traslado resultante es hacia la bocana de la desembocadura.
- Por otro lado, tras el análisis de los resultados obtenidos en función de la dirección predominante del oleaje, se destaca de una dinámica intensa en las zonas más cercanas a la bocana de la desembocadura y, por lo tanto, un mayor transporte de sedimentos y variaciones en la batimetría con respecto a la inicial en combinaciones de clima de tormenta. En cambio, con combinaciones de clima en régimen medio o estados de calma, se observa un mayor transporte de sedimentos en las zonas de las costas portuguesa y española además de la tendencia de la deposición de sedimentos en la zona más cercana al dique de encauzamiento.

Concluyendo, caracteriza a la zona de estudio como un dominio muy dinámico, con gran transporte de sedimentos y de acción de las mareas, con un oleaje con una dirección predominante bastante aislada y con grandes cambios en su batimetría en tormentas que no tienen una duración muy prolongada además de en estados de calma con duración más prolongada. Por lo tanto, se define como un dominio que no se encuentra en equilibrio dinámico debido a la construcción del encauzamiento del estuario, entre otras obras civiles, y al continuo cambio en la regulación a la que ha sido sometido el río a lo largo de la historia mediante la construcción de embalses en su recorrido. Por otro lado, se demuestra que la tendencia de la dinámica de la desembocadura, debido a los diversos factores que se han ido desarrollando y describiendo a lo largo del trabajo, es de ser cerrada mediante la deposición de sedimentos y a la generación de diferentes formaciones a lo largo de la zona más cercana a la bocana de la desembocadura. Este hecho es explicado mediante los continuos trabajos de dragado que se realizan en la misma para poder seguir posibilitando la navegación de un río tan importante en el panorama español como es el Guadiana.

CAPÍTULO 6

FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

En lo que concierne a las futuras líneas de investigación, durante el proceso de elaboración de este trabajo se han considerado los temas que se exponen a continuación.

En primer lugar, resultaría muy útil la validación del modelo mediante la comprobación de magnitudes medidas en campo, como por ejemplo el sedimento acumulado en zonas de mayor interés. Este hecho posibilitaría la aceptación del modelo a la hora de simular el dominio de estudio y de los resultados obtenidos a través del mismo y la posibilidad de seguir con un análisis y comprobaciones más puntuales, locales y exactas para llegar al conocimiento de hipotéticas soluciones ante este problema.

Por otro lado, resultaría muy útil la validación del modelo con otros periodos de tiempo y campañas de datos. Este trabajo no cuenta con financiación por lo que se ha partido de los datos de partida disponibles tras una amplia búsqueda por parte del tutor Alejandro López. Sin embargo, debido a las importantes conclusiones que han sido posibles de obtener con este trabajo y la fuerte implicación que tendría en los futuros estudios que se realicen en la zona de estudio, se considera interesante repetir el trabajo, pero ya no desde este punto de vista didáctico, sino, realizando previamente mediciones propias de batimetría y campaña de datos.

En cuanto al alcance del trabajo, el estudio puede avanzar en torno a no centrarse en la desembocadura del río, sino realizar también un estudio detallado de las zonas de marismas encontradas en Ayamonte e Isla Cristina y en las zonas más internas de la desembocadura, añadiendo al dominio de estudio el curso bajo del río, o en su defecto, desde el último embalse de regulación antes de la propia desembocadura.

Por otra parte, destacar la posibilidad del uso y utilización del modelo generado en este trabajo como base de futuros proyectos en los cuales se pueda estudiar el comportamiento dinámico de la desembocadura frente a modificaciones en busca de una solución óptima; como puede ser la construcción de algún dique u otra obra civil, un aporte de material en alguna de las dos costas abarcadas o incluso en la bocana de la desembocadura, o la realización de un dragado en alguna ubicación estratégica del ámbito de estudio. Además, este modelo se podría utilizar como base ante el estudio de diferentes temporales no seleccionados en este trabajo, o incluso, simulaciones que abarquen periodos de tiempo mayores para una comprobación más real de las conclusiones expuestas en el mismo junto con un estudio más detallado de la influencia de la descarga del río y su modificación en cuanto a caudal y aporte de sólidos generados por una posible regulación y control de dichas magnitudes aguas arriba del mismo.

APÉNDICE A

CLIMA MARÍTIMO

A.1 Implementación del modelo en la zona de estudio

Los datos empleados para el estudio del clima marítimo en la desembocadura del río Guadiana son los del punto SIMAR 5026021 de Puertos del Estado.

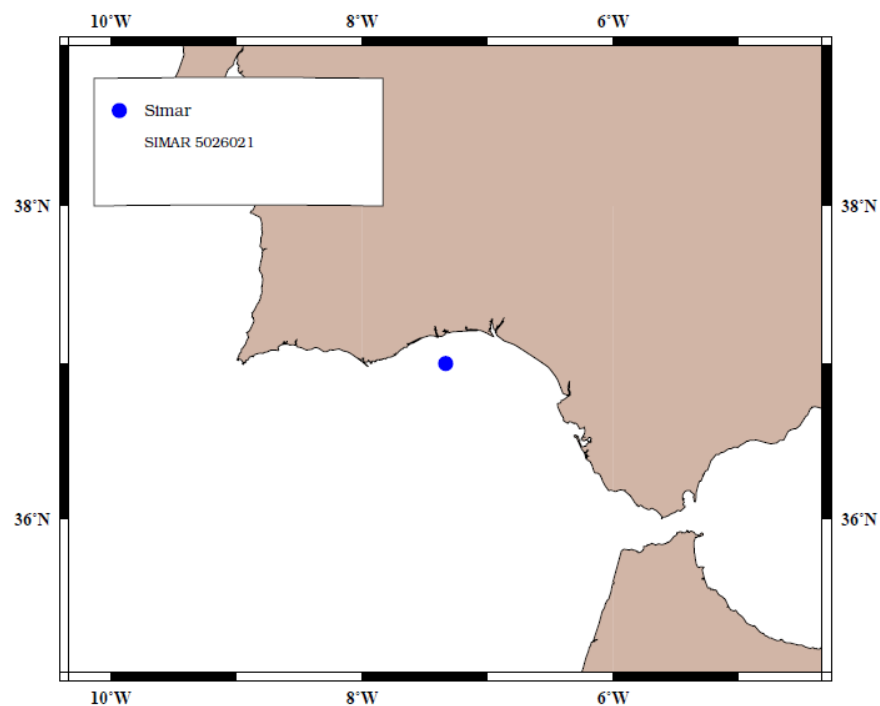


Figura A. 1 Localización del punto SIMAR 5026021.

A continuación, se analiza tanto para el oleaje como para el viento:

- Descripción general en aguas profundas.
- Régimen medio.
- Régimen extremal.

A.2 Oleaje

A.2.1 Descripción general del oleaje en profundidades indefinidas

Se comienza realizando una descripción general de las características del oleaje en profundidades indefinidas en la zona de estudio a partir de los siguientes gráficos:

- Serie temporal de las alturas de ola significativa H_s desde 1958 hasta mediados del 2018 (Figura A. 2).
- Histogramas y tablas que discretizan el oleaje en función de la altura de ola significativa H_s , periodo de pico T_p y dirección del oleaje θ (Figura A. 3, Figura A. 4 y Figura A. 5).
- Gráficos de dispersión entre las variables H_s , T_p , θ (Figura A. 6, Figura A. 7 y Figura A. 8).
- Rosa de oleaje (Figura A. 9).

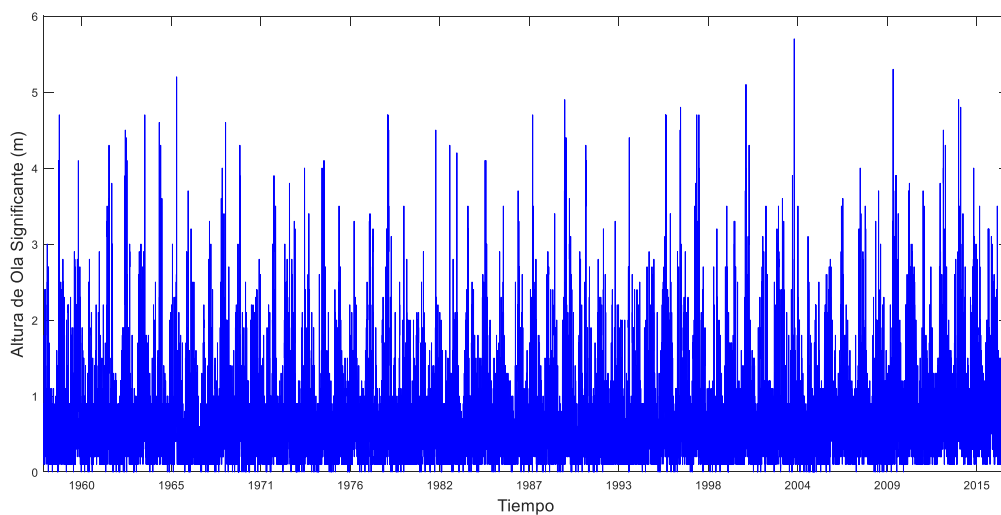


Figura A. 2. Serie temporal de altura de ola Significante

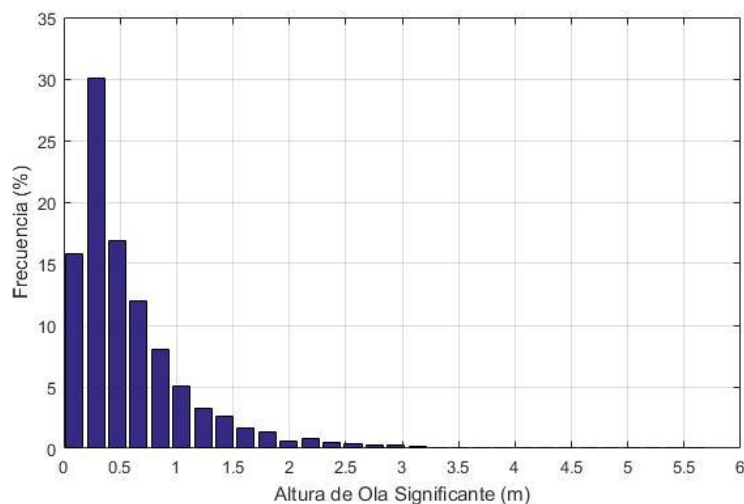


Figura A. 3. Histograma de Altura de Ola

Hm (m)	Fr (%)
0 - 0,2	15,804
0,2 - 0,4	30,057
0,4 - 0,6	16,867
0,6 - 0,8	11,995
0,8 - 1	8,013
1 - 1,2	5,039
1,2 - 1,4	3,283
1,4 - 1,6	2,590
1,6 - 1,8	1,678
1,8 - 2	1,345
2 - 2,2	0,569
2,2 - 2,4	0,779
2,4 - 2,6	0,514
2,6 - 2,8	0,387
2,8 - 3	0,296
3 - 3,2	0,229
3,2 - 3,4	0,136
3,4 - 3,6	0,102
3,6 - 3,8	0,094
3,8 - 4	0,070
4 - 4,2	0,027
4,2 - 4,4	0,045
4,4 - 4,6	0,035
4,6 - 4,8	0,022
4,8 - 5	0,017
5 - 5,2	0,005
5,2 - 5,4	0,002
5,4 - 5,6	0,001
5,6 - 5,8	0,0004
5,8 - 6	0,0004

Tabla A. 1. Porcentaje de Alturas de Ola

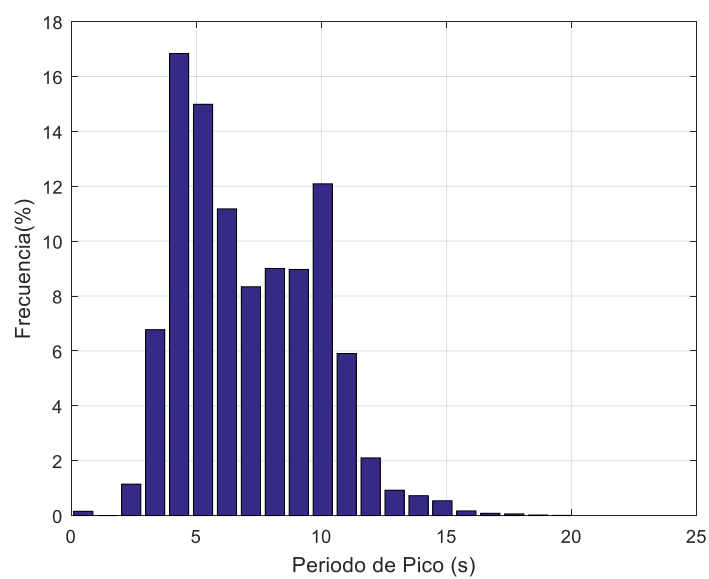


Figura A. 4. Histograma de Periodos de Pico

Tp (s)		Fr (%)
0	- 1	0,155
1	- 2	0,000
2	- 3	1,144
3	- 4	6,775
4	- 5	16,837
5	- 6	14,987
6	- 7	11,176
7	- 8	8,338
8	- 9	9,005
9	- 10	8,968
10	- 11	12,089
11	- 12	5,904
12	- 13	2,100
13	- 14	0,923
14	- 15	0,724
15	- 16	0,538
16	- 17	0,169
17	- 18	0,082
18	- 19	0,059
19	- 20	0,019
20	- 21	0,007

Tabla A. 2. Porcentaje de Periodos de Pico

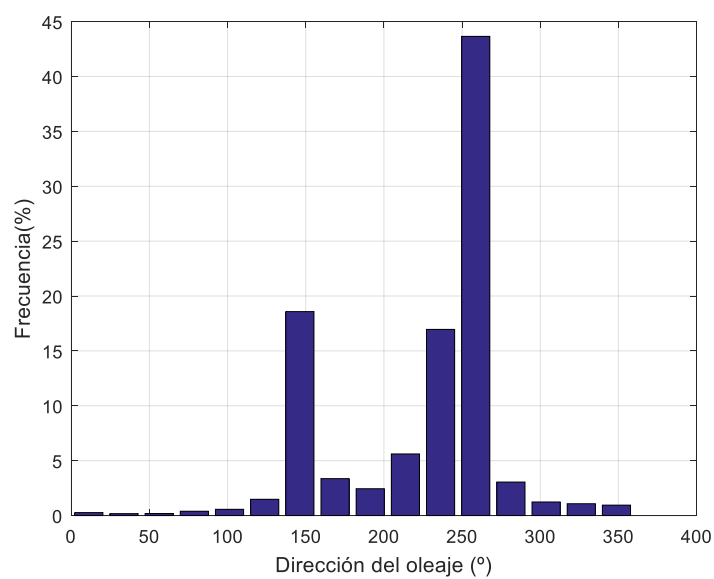


Figura A. 5. Histograma Dirección del Oleaje

$\Theta (^{\circ})$	Fr (%)
N	0,270
NNE	0,176
NE	0,183
ENE	0,392
E	0,567
ESE	1,480
SE	18,583
SSE	3,365
S	2,445
SSW	5,612
SW	16,960
WSW	43,656
W	3,051
WNW	1,235
NW	1,078
NNW	0,948

Tabla A. 3. Porcentajes de Dirección del Oleaje

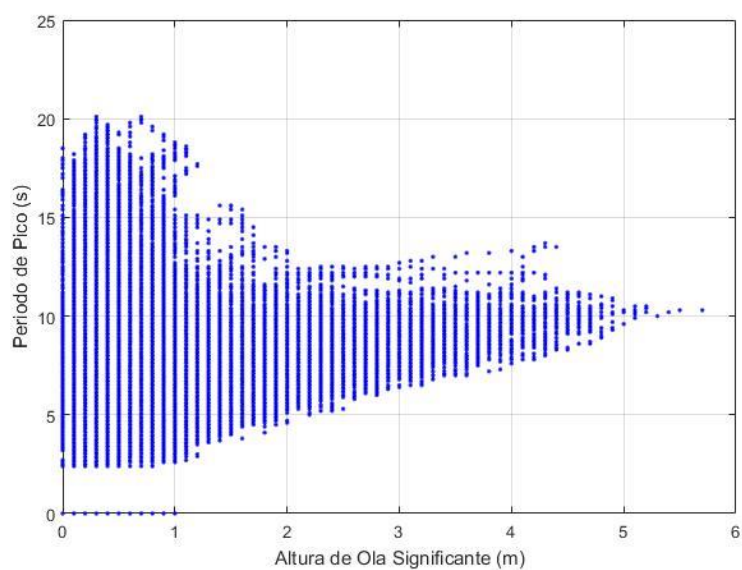


Figura A. 6. Gráfico de Dispersión $T_p - H_s$

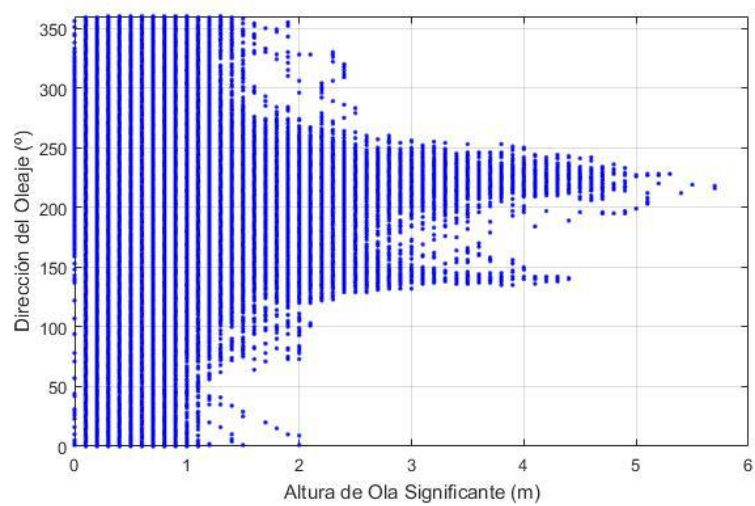


Figura A. 7. Gráfico de Dispersión $H_s - \Theta$

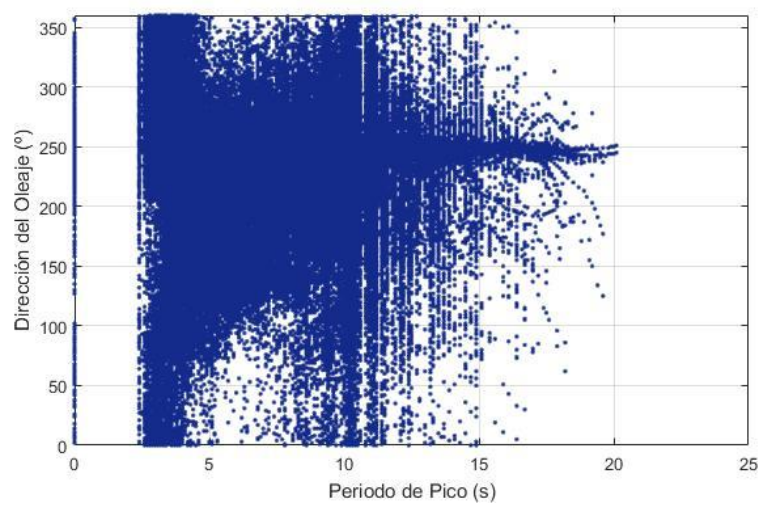


Figura A. 8. Gráfico de Dispersión $T_p - \Theta$

Se presenta a continuación la rosa de oleaje del punto SIMAR:

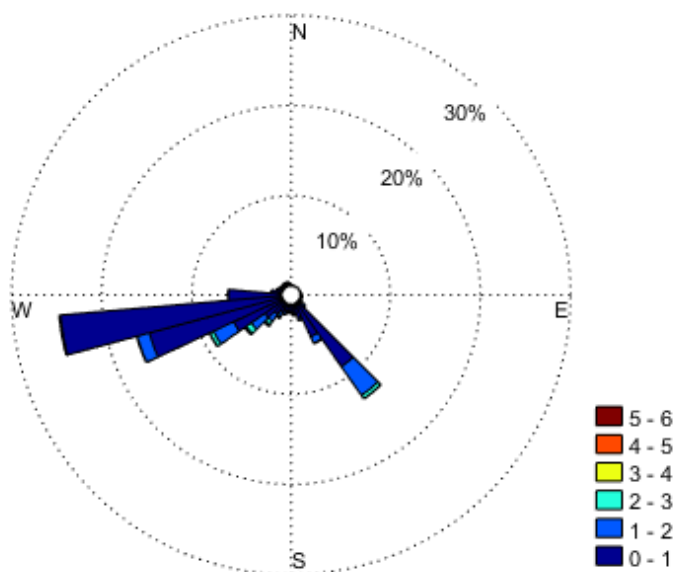


Figura A. 9. Rosa de oleaje "SIMAR 5026021"

Los resultados a destacar de la descripción general del oleaje en profundidades indefinidas son:

- Alturas de ola con valores entre 0 y 6 m.
- Las alturas de ola más frecuentes están entre 0.1 y 1 m.
- El rango de periodos de pico entre 2 y 21 s.
- Los periodos de pico más frecuentes tienen valores comprendidos entre 4 y 6 s.
- La dirección de procedencia del oleaje más frecuente es WSW.

A.2.2 Régimen medio de H_s en profundidades indefinidas

Se procede a la obtención, considerando todas las direcciones, el régimen medio de oleaje en profundidades indefinidas para la Altura de Ola Significante H_s .

Todos los regímenes medios de altura de ola significativa se ajustan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por:

$$y = f(x|a, b) = ba^{-b}x^{b-1}e^{\left(\frac{-x}{a}\right)^{-b}} I_{(0, \infty)}(x) \quad (\text{A. 8})$$

En la Tabla A. 4 se muestran los parámetros de ajuste del régimen medio de altura de ola significativa obtenidos según la distribución Weibull.

Parámetros	a	b
	0,6041	1,1354

Tabla A. 4. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio de altura de ola

Una vez calculados y conocidos los parámetros, se obtienen las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En la Figura A. 10 se representa la función de densidad de los datos ajustado según la distribución Weibull junto con el histograma de las frecuencias de los datos reales; a través de esta gráfica, se observa la probabilidad de ocurrencia de cada altura de ola. En la Figura A. 11 se representa el histograma de

frecuencias acumuladas junto con la función de distribución de probabilidad de no excedencia, es decir, la probabilidad de que cada altura de ola no sea superada.

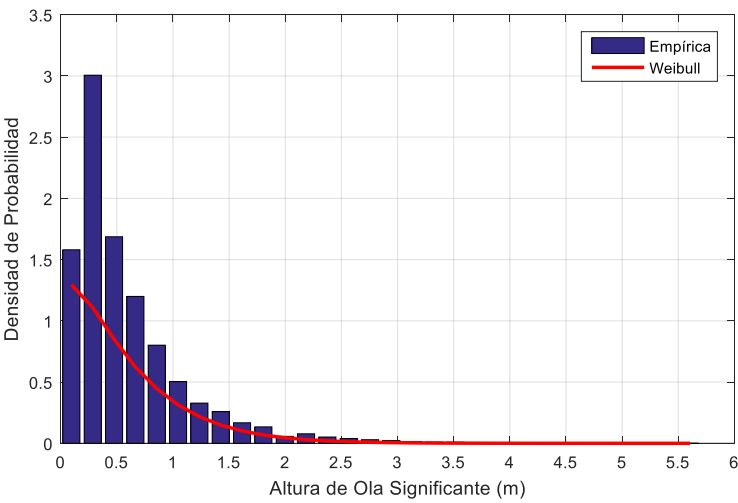


Figura A. 10. Función de densidad de probabilidad tipo Weibull para régimen medio de altura de ola

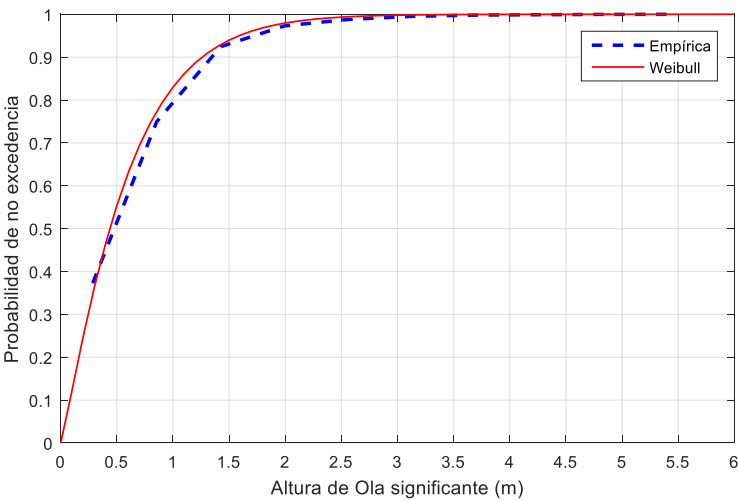


Figura A. 11. Función de distribución tipo Weibull para régimen medio de altura de ola

Como resumen del régimen medio para la altura de ola se presenta la Tabla A. 5:

Probabilidad de no excedencia	Altura de ola significativa (m)
50%	0.45 m
85%	1.05 m

Tabla A. 5. Tabla resumen del régimen medio para la altura de ola

A.2.3 Régimen extremal de H_s en profundidades indefinidas

Para obtener el régimen extremal se ha aplicado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Se ha establecido la altura de ola umbral de 2.7 m, correspondiente al valor que es superado en la serie histórica disponible en menos del 1%. Por otro lado, para garantizar la independiente estadística entre

sucesos (temporales), se ha supuesto que la duración mínima entre los mismos debe ser superior a 48 horas. De esta manera, se han obtenido 245 eventos extremales en los 58 años meteorológicos analizados.

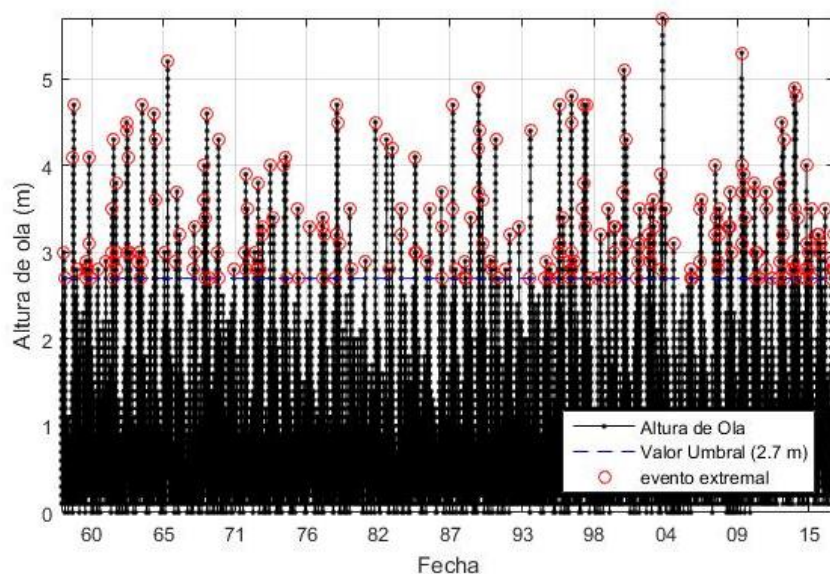


Figura A. 12. Picos de Altura de Ola sobre Umbral con $H_{s,u} = 2.7 \text{ m}$

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma de la distribución utilizada es:

$$y = f(x|k, \mu, \sigma) = \left(\frac{1}{\sigma}\right) \exp\left(-\left(1 + k\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right) \left(1 + k\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1 - \frac{1}{k}} \quad (\text{A. 9})$$

La distribución generalizada de los Valores Extremos (GEV) une las distribuciones de tipo I (Gumbel), tipo II (Frechet) y tipo III (Weibull) en una sola familia para permitir un rango continuo de posibles ajustes. Esta distribución posee unos parámetros de localización y de escala, μ y σ , y un parámetro de forma k . De este modo, cuando $k < 0$, la distribución es equivalente al valor de tipo III (Weibull); cuando $k > 0$, es equivalente a la de tipo II (Frechet); y cuando $k = 0$, se convierte en tipo I (Gumbel).

En la Tabla A. 6 se muestran los parámetros de ajuste del régimen extremal de altura de ola significante obtenidos según la distribución de Valores Extremos Generalizada:

k	σ	μ	Distribución equivalente	Número de eventos
0.5862	0.3213	2.9544	Frechet	245

Tabla A. 6. Parámetros de la distribución GEV para el régimen extremal de altura de ola

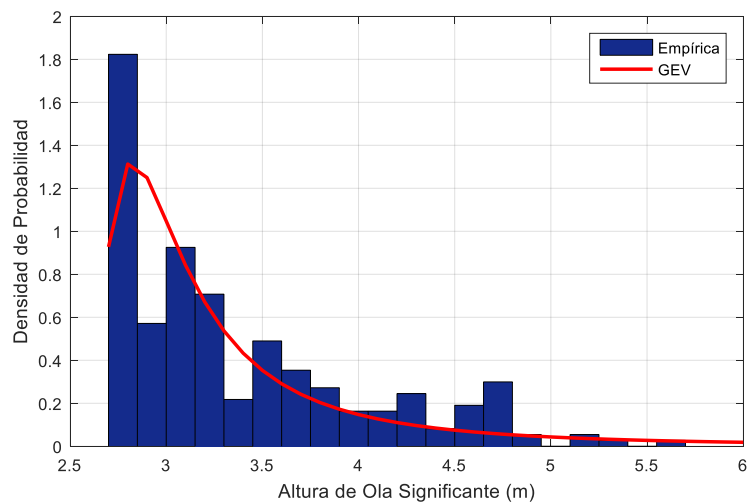


Figura A. 13. Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola

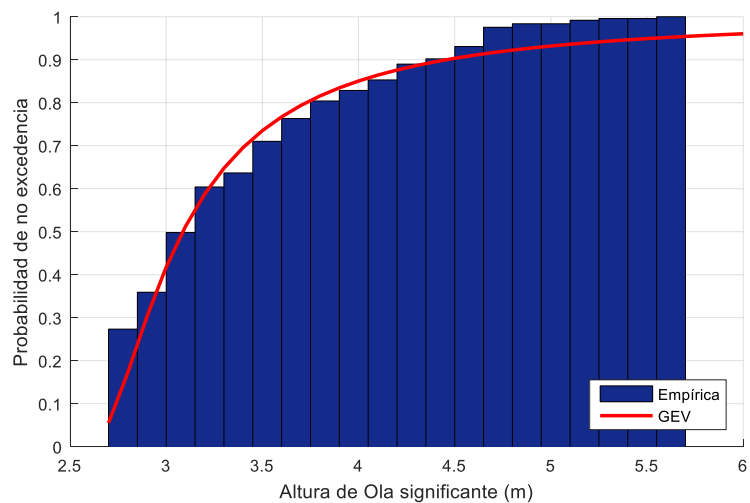


Figura A. 14. Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de altura de ola

Como resumen del régimen extremal para la altura de ola se presenta la Tabla A. 7:

Probabilidad de no excedencia	Altura de ola significativa (m)
50%	3.1 m
85%	3.8 m

Tabla A. 7. Tabla resumen del régimen extremal para la altura de ola

A.3 Viento

A.3.1 Descripción general del viento en profundidades indefinidas

Se realiza una descripción general de las características del viento en profundidades indefinidas en la zona de estudio en la cual se mostrará:

- Serie temporal de la velocidad de viento desde 1958 hasta 2017(Figura A. 15).

- Dos histogramas y tablas que los discretizan, uno por cada variable: V_v y θ_v (Figura A. 16 y Figura A. 17).
- Un gráfico de dispersión entre las variables V_v y θ_v (Figura A. 18).
- Rosa de los vientos (Figura A. 19).

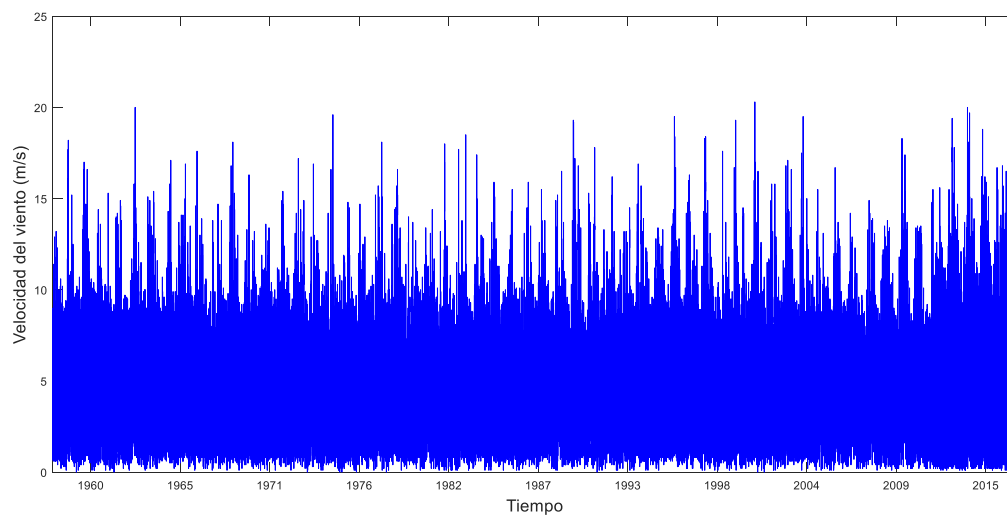


Figura A. 15. Serie temporal de velocidades de viento.

Vv (m/s)	Fr (%)
0 - 1	2,129
1 - 2	8,283
2 - 3	11,105
3 - 4	12,511
4 - 5	15,685
5 - 6	15,938
6 - 7	12,376
7 - 8	9,438
8 - 9	5,946
9 - 10	2,801
10 - 11	1,742
11 - 12	0,929
12 - 13	0,478
13 - 14	0,315
14 - 15	0,157
15 - 16	0,075
16 - 17	0,045
17 - 18	0,025
18 - 19	0,015
19 - 20	0,006
20 - 21	0,003

Tabla A. 8. Porcentajes de velocidades de viento.

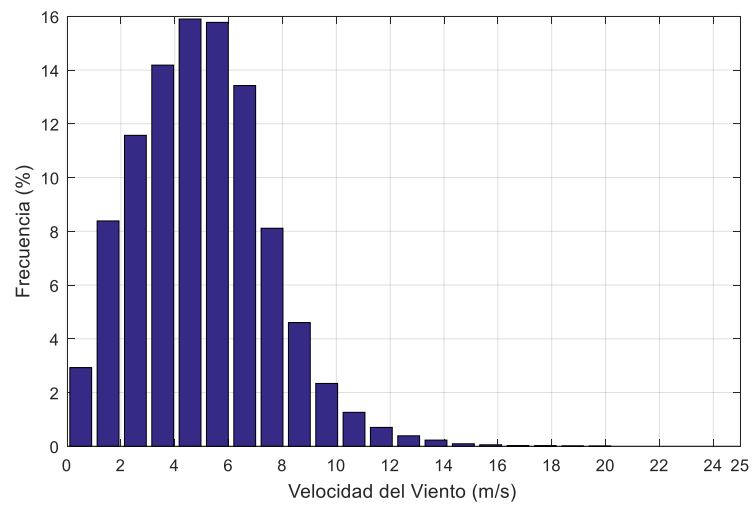


Figura A. 16. Histograma de velocidades de viento

Θ_v (°)	Fr (%)
N	5,212
NNE	4,581
NE	6,093
ENE	6,270
E	4,775
ESE	4,337
SE	2,944
SSE	3,152
S	4,009
SSW	6,640
SW	9,275
WSW	8,442
W	6,172
WNW	6,935
NW	9,921
NNW	11,243

Tabla A. 9. Porcentaje de velocidades de viento

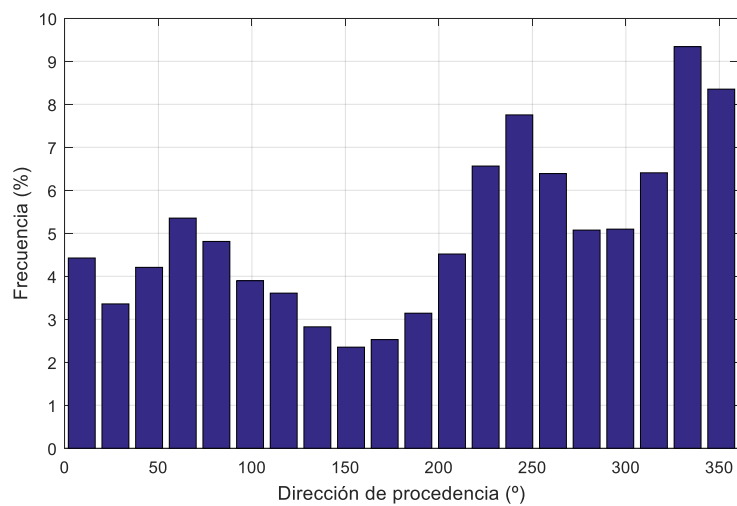


Figura A. 17. Histograma de dirección media de procedencia

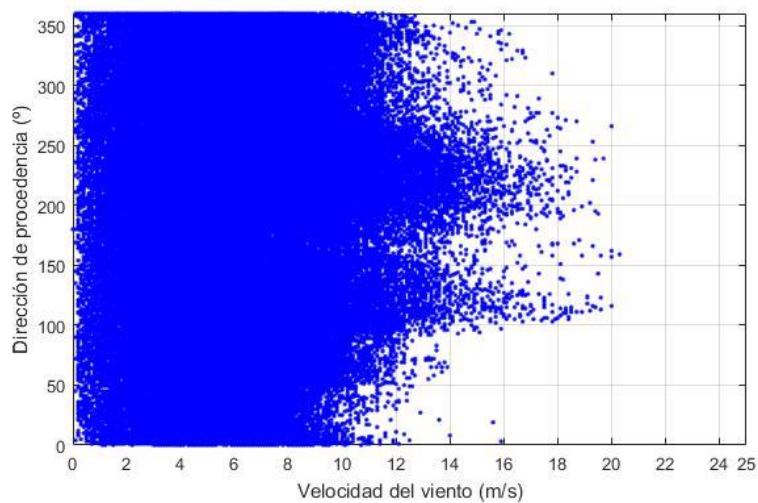


Figura A. 18. Gráfico de dispersión $V_v - \theta_v$

Se presenta a continuación la rosa de viento de los datos del punto SIMAR:

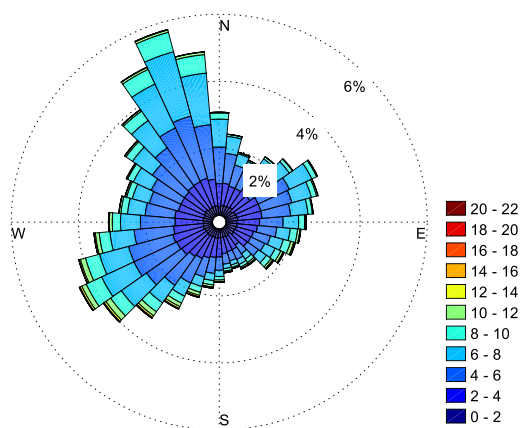


Figura A. 19. Rosa de Viento

Como resumen de los resultados parciales, mencionar que los más reseñables de la descripción general

del viento en profundidades indefinidas son:

- Rango de velocidades de viento entre 0 y 21 m/s.
- Las velocidades de viento más frecuentes están entre 4 y 6 m/s.
- Las direcciones de precedencia media de viento más frecuentes son NNW y SW.

A.3.2 Régimen medio de V_s en profundidades indefinidas

Se obtiene el régimen medio de velocidades de viento en profundidades indefinidas teniendo en cuenta todas las direcciones.

Todos los regímenes medio de velocidad de viento se adjuntan a una distribución de probabilidad tipo Weibull cuya función de densidad viene representada por la Ecuación (A. 8).

En la Tabla. se muestra los parámetros de ajuste del régimen medio de velocidad de viento obtenidos según la distribución Weibull.

Parámetros	a	b
	5.6481	2.16

Tabla A. 10. Parámetros de la distribución Weibull para el régimen medio de velocidades de viento.

Una vez calculados y conocidos los parámetros, se obtienen las funciones de densidad y distribución de probabilidad. En Figura A. 20 se representa la función de densidad de los datos ajustado según la distribución Weibull junto con el histograma de las frecuencias de los datos reales; a través de esta gráfica, se observa la probabilidad de ocurrencia velocidad del viento. En la Figura A. 21 se representa el histograma de frecuencias acumuladas junto con la función de distribución de probabilidad de no excedencia, es decir, la probabilidad de que cada velocidad del viento no sea superada.

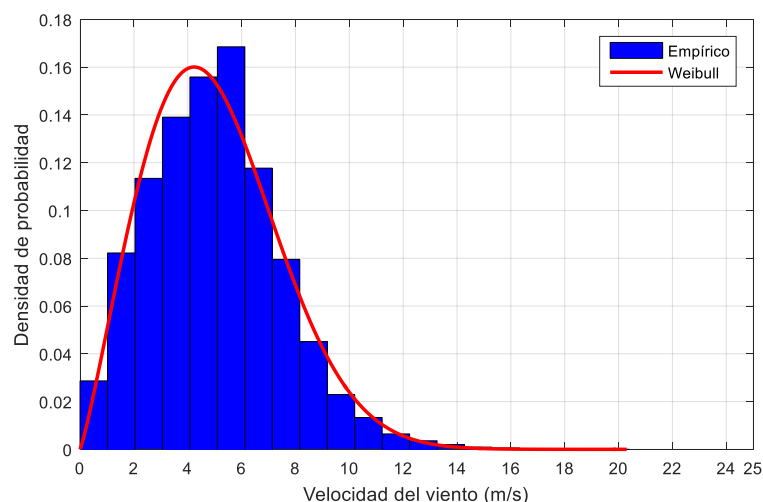


Figura A. 20. Función de densidad tipo Weibull para el régimen medio de velocidades de viento

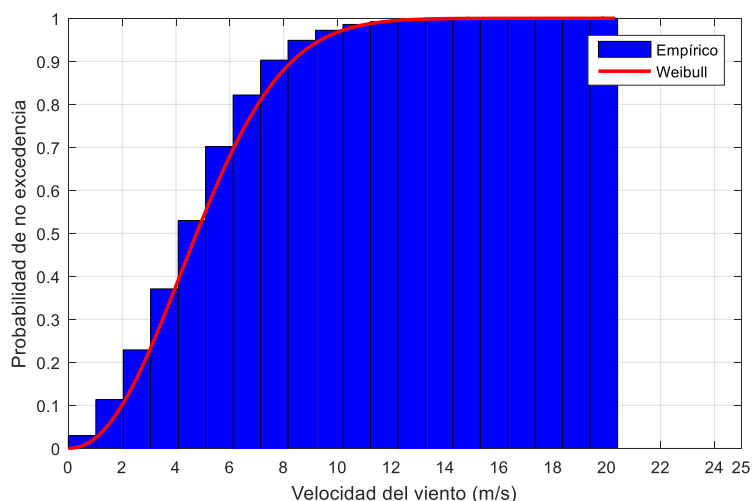


Figura A. 21. Función de distribución tipo Weibull para el régimen medio de velocidades de viento.

En cuanto a los resultados parciales, como resumen del régimen medio para a velocidad del viento se presenta la Tabla A. 11.

Probabilidad de no excedencia	Velocidad del viento (m/s)
50%	4.8
85%	7.6

Tabla A. 11. Tabla resumen del régimen medio para la velocidad del viento.

A.3.3 Régimen extremal de V_s en profundidades indefinidas

Para obtener el régimen extremal se ha aplicado el método de Picos Sobre Umbral (POT, Peaks Over Threshold). Se ha establecido la velocidad del viento umbral de 11.8 m/s, correspondiente al valor que es superado en la serie histórica disponible en menos del 1%. Por otro lado, para garantizar la independiente estadística entre sucesos (temporales), se ha supuesto que la duración mínima entre los mismos debe ser superior a 48 horas. De esta manera, se han obtenido 950 eventos extremales en los 58 años meteorológicos analizados.

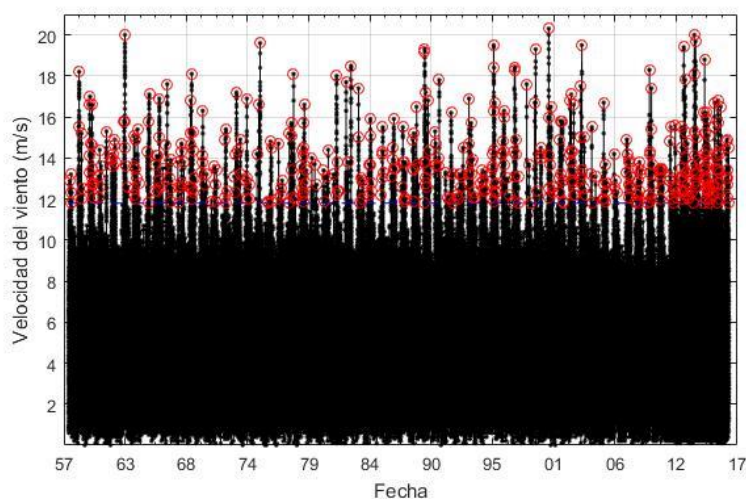


Figura A. 22. Picos de velocidad de viento sobre umbral con $V_p = 11.8 \text{ m/s}$

Para caracterizar el régimen de picos sobre umbral, se utiliza la distribución de Valores Extremos Generalizada representativa del régimen. La forma general de la distribución utilizada es la mostrada en la Ecuación (A. 9).

En la Tabla A. 12. se muestran los parámetros de ajuste del régimen extremal de velocidades de viento obtenidos según la distribución GEV.

k	σ	μ	Distribución equivalente	Número de eventos
0.2969	1.0392	12.8797	Frechet	950

Tabla A. 12. Parámetros de la distribución GEV para el régimen extremal de velocidad del viento

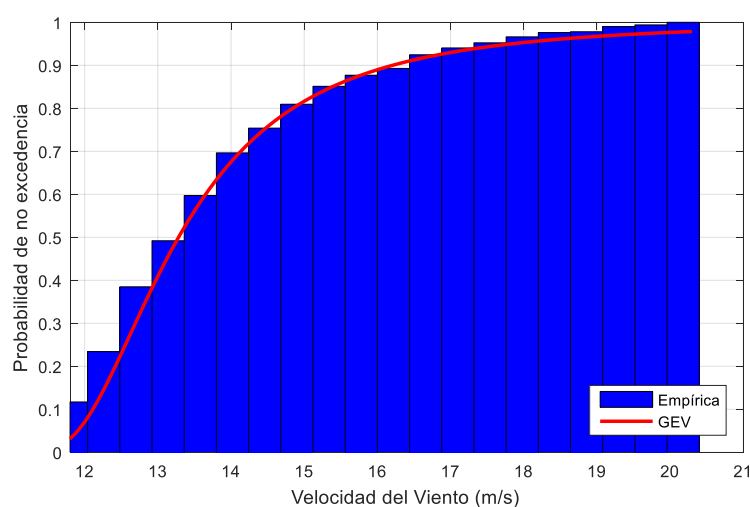


Figura A. 23. Función de densidad tipo GEV para el régimen extremal de velocidades de viento

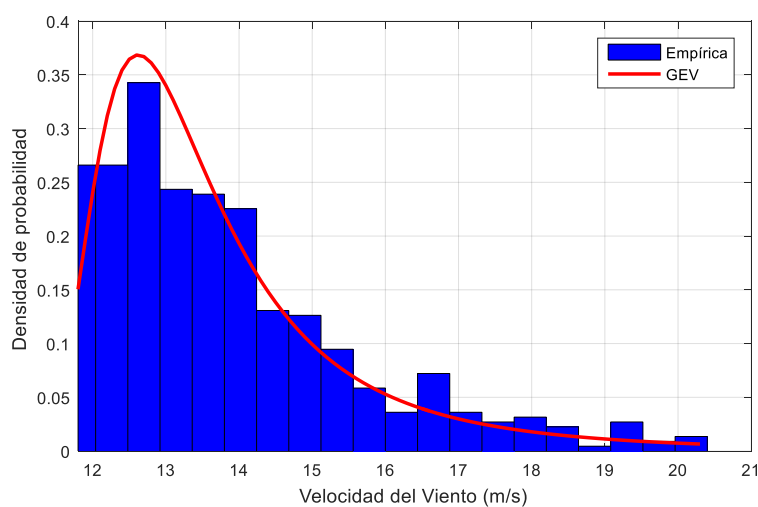


Figura A. 24. Función de distribución tipo GEV para el régimen extremal de velocidades de viento

Como resumen del régimen extremal para la velocidad del viento se presenta la siguiente tabla:

Probabilidad de no excedencia	Velocidad del viento (m/s)
50%	13.3
85%	15.5

Tabla A. 13. Tabla resumen del régimen extremal para la velocidad del viento

REFERENCIAS

- Ambiente, C. d. (1997). Modelo de gestión del estuario del río Guadiana.
- Autor, O. (2001). Otra cita distinta. *revista*, pág. 12.
- Borrego. (1992).
- CEDEX. (2013). Estudio de actuación del tramo de costa comprendido entre las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir. *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*.
- Cistina Aguilar Correa, A. L. (2016). Modelado Hidrodinámico de la Fecha de El Rompido y su entorno. págs. 32-33.
- Da Silva Costa, M., & Fraidias Amarillo, j. (1997). Modelo de gestión del estuario del río Guadiana. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía*.
- Dean, R. G. (2001). Coastal Processes with Engineering Applications. . *Cambridge University Press*.
- Deltares. (2011). Delft3D-FLOW. Simulation of Multi-dimensional Hydrodynamic Flow and Transport Phenomena, Including Sediments - User Manual.
- Enríquez Fernández, J. (2000). Estudio integral de la costa de Huelva- Dinámica litoral. *HIDTMA, S.L. (Informe técnico para la Dirección General de Costas)*.
- Garel, E. (2017). EFFICIENT DREDGING STRATEGY FOR CHANNEL MAINTENANCE OF THE GUADIANA EBB-DELTA. *Coastal Dynamics, Paper No. 232*.
- Garel, E. F. (2011). *Effects of the Alqueva Dam on sediment fluxes at the mouth of the Guadiana estuary*. .
- Gonzalez, R. D. (2001). *Recent rapid evolution of the Guadiana Estuary mouth (southwestern Iberian Peninsula)*. *J. Coast. Res. Proc. Int. Coast.*
- Hasselmann, K. B. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (jonswap). Technical report, Deutsches Hydrographisches Institut.
- HIDTMA. (2011). Plan Director para la Gestión Sostenible de la Costa. *Demarcación Hidrográfica de Guadiana y Guadalquivir; Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar*.

- IMA, C. M. (1997). Informe Medio Ambiental.
- José Fraidías Amarillo, A. L. (1997). *Modelo de gestión del estuario del río Guadiana*. Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente.
- Lesser, G. R. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. 51:883–915. págs. 51:883-915.
- LNEC. (2002). *Embocadura do Guadiana. Estudo da evolução do banco exterior*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Morales González, J. (1997). Sedimentología del estuario del río Guadiana (SW España-Portugal). *Tesis Doctoral – Universidad de Sevilla*.
- Portela, L. (2006). *Sediment delivery from the Guadiana estuary to the coastal ocean*.
- Rijin, V. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas.
- Whitham. (1974). Linear and nonlinear waves. 2(13), pág. 125.